

CONSERVATOIRE BOTANIQUE NATIONAL DE BREST
UMR6554 LETG CNRS - Université de Brest, Nantes et Rennes 2

Cartographie des grands types de végétation par télédétection : étude de faisabilité (Bretagne, Basse-Normandie et Pays-de-la Loire)

2011-2012

Réalisation :

Vanessa SELLIN

Autres contributions :

Sébastien RAPINEL (CDD au CBN de Brest)
Antoine JANVRE (Stage volontaire CBN de Brest/UMR LETG)

Coordination :

Françoise GOURMELON et Sylvie MAGNANON

Responsabilité scientifique :

UMR LETG : Françoise DEBAINE, Françoise GOURMELON, Laurence HUBERT-MOY
CBN de Brest : Sylvie MAGNANON

Pilotage:

Bernard CLEMENT (UMR ECOBIO)
Laurence DAVID (UMR LETG)
Loïc DELASSUS (CBN de Brest)
Dominique DHERVE (CBN de Brest)
Jean NABUCET (UMR LETG)

Partenaires du projet :

Conservatoire Botanique National de Brest (CBN de Brest), Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) de Bretagne, Basse Normandie et Pays de la Loire, Conseils Régionaux de Bretagne, Basse Normandie et Pays de la Loire, Agence de l'eau Seine-Normandie, FEDER, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Université de Brest, Université de Nantes, Université de Rennes 2.

Cette étude est réalisée sous couvert d'une convention de recherche CNRS (DR17)/CBN DE BREST, ayant bénéficié d'un soutien ISIS pour l'acquisition d'images SPOT.

Sommaire

INTRODUCTION	5
1- CONTEXTE DE L'ETUDE	5
2- OBJECTIF	6
PARTIE 1 : Cartographie des végétations terrestres par télédétection :	
synthèse bibliographique	8
1- Les différents systèmes de classification de la végétation	8
1.1- Classifications utilisées aux niveaux national et international	8
1.2- Classifications utilisées sur le territoire d'étude	10
2- Les approches cartographiques à base d'images	11
2.1- Historique de l'évolution des images et des traitements	12
2.2- La photo-interprétation	12
2.3- Les méthodes de classification automatique	15
2.3.1- La méthode pixel	15
2.3.2- L'approche orientée-objet	16
2.4- Conclusion	23
PARTIE 2 : Méthodologie	25
1- La méthodologie	25
2- La typologie	25
3- Présentation des sites d'étude	26
3.1- Le site Natura 2000 du complexe du Menez-Hom	29
3.2- La réserve naturelle régionale des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie	30
3.3- Le site Natura 2000 des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay	30
3.4- Le site Natura 2000 du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay	31
4- Les données	32
4.1- Les données images	32
4.2- Les données auxiliaires	34
4.2.1- Les données vectorielles	34
4.2.2- Les données matricielles	36
5- Traitements	36
5.1- La typologie « de travail »	36
5.2- Logiciels	38
5.3- Les types de classification	38
5.3.1- L'approche orientée-objet	38
5.3.1.1- Segmentation	38
5.3.1.2- Classification	42
5.3.2- L'approche pixel supervisée	42
5.4- BDORTHO® IRC	42
5.4.1- Prétraitements	42
5.4.2- Données auxiliaires mobilisées	43
5.4.3- Présentation du réseau hiérarchique de classification de la BDORTHO®IRC	43
5.5- SPOT5	44

5.5.1- Prétraitements.....	44
5.5.1.1- Fusion de l'image SPOT5.....	46
5.5.1.2- Corrections atmosphériques.....	46
5.5.1.3- Corrections géométriques.....	46
5.5.2- Données auxiliaires mobilisées.....	47
5.5.3- Présentation du réseau hiérarchique de classification de l'image SPOT.....	47
5.6- Worldview-2.....	49
5.6.1- Prétraitements.....	49
5.6.1.1- Fusion de l'image Worldview-2.....	49
5.6.1.2- Corrections atmosphériques.....	50
5.6.1.2- Corrections géométriques.....	50
5.6.2- Données auxiliaires mobilisées.....	50
5.6.3- Présentation du réseau hiérarchique de classification de l'image Worldview-2.....	50
5.7- Amélioration de la qualité de la classification finale.....	53
5.8- Validation.....	54
PARTIE 3 : Résultats.....	57
1- Bilan du traitement de la BDORTHO® IRC.....	57
1.1- Niveau 1.....	57
1.2- Niveau 2.....	57
1.3- Niveau 3.....	58
1.4- Conclusions.....	61
2- Bilan du traitement de l'image SPOT5.....	61
2.1- Niveau 1.....	62
2.2- Niveau 2.....	62
2.3- Niveau 3.....	63
2.4- Conclusions.....	64
3- Bilan du traitement de l'image Worldview-2.....	65
3.1- Niveau 1.....	65
3.2- Niveau 2.....	65
3.3- Niveau 3.....	66
3.4- Conclusions.....	66
4- Bilan comparatif des images.....	67
4.1- Niveau 1.....	67
4.2- Niveau 2.....	67
4.3- Niveau 3.....	68
PARTIE 4 : Bilan et perspectives.....	73
1- Estimation des coûts.....	73
1.1- BDORTHO® IRC.....	73
1.2- SPOT5.....	74
1.3- Worldview-2.....	75
1.4- Bilan comparatif.....	75
2- Bilan de la méthode et perspectives.....	76
2.1- Données auxiliaires.....	76
2.2- Acquisition d'autres images.....	77
2.2.1- Multi-date.....	77

<u>2.2.2- autre capteurs</u>	78
<u>2.3- Photo-interprétation</u>	78
<u>2.4- Ajustements de la typologie emboîtée des végétations</u>	79
<u>2.5- Récapitulatif des principales recommandations</u>	79
CONCLUSION	83
BIBLIOGRAPHIE	87
LISTE DES ILLUSTRATIONS	93
LISTE DES TABLEAUX	95
LISTE DES ANNEXES	97

INTRODUCTION :

1- CONTEXTE DE L'ETUDE :

Grâce à la mise en place il y a plus de 40 ans de plusieurs programmes d'inventaire et de cartographie de la flore à l'échelle européenne, nationale ou régionale (Dupont 1962 et 1967 ; Magnanon 1992 ; Diard 2005 ; Philippon *et al.* 2006 ; Rivière 2007 ; Quéré *et al.* 2008), la répartition des plantes vasculaires du nord-ouest de la France commence à être bien connue. Des bases de données spécifiques comme celles du Conservatoire Botanique National de Brest – CBN de Brest (*Calluna*, *SuiviFlore*) permettent aujourd'hui de rassembler et d'exploiter près de 3 millions de données de localisation d'espèces végétales. Il n'en est pas de même pour les végétations ni pour les habitats dont les premiers inventaires systématiques n'ont pour l'instant été engagés que de manière ponctuelle.

Au niveau national, plusieurs synthèses (Olivier *et al.* 2010 ; Benetitti *et al.* 2012) ont montré que nous manquons d'informations sur la connaissance de la diversité, de la fréquence, de la répartition, de l'état de conservation des habitats naturels et semi-naturels, ainsi que des pressions qu'ils subissent. C'est pourquoi le Ministère en charge de l'environnement a souhaité, en 2010, mettre en place un programme de cartographie nationale des habitats (CARHAB), qui devrait se déployer pleinement en 2013. Il a pour objectif de fournir des réponses aux administrations et collectivités en matière de gestion des territoires et de prise en compte de la biodiversité.

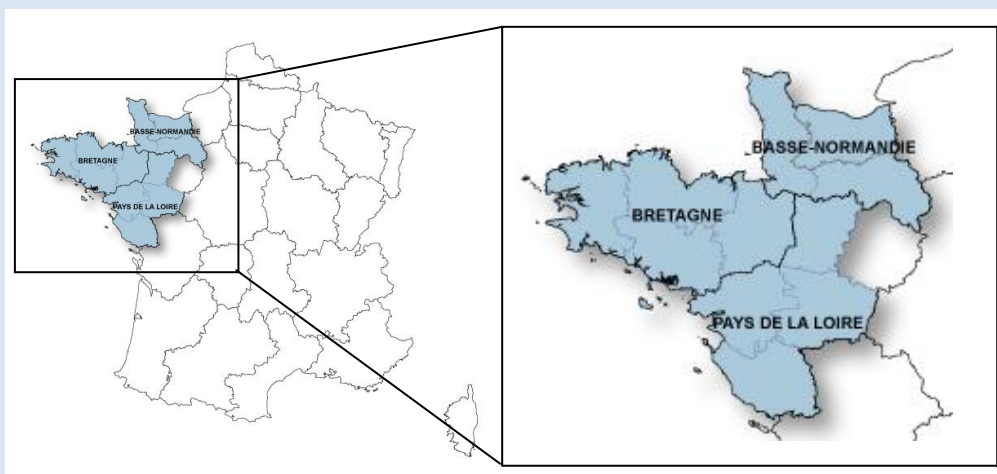
Au niveau régional, plusieurs initiatives allant dans le même sens ont été engagées (SIRS 2009 ; Brunet et Renaud 2010 ; Roche *et al.* 2010). Ainsi sur le territoire d'agrément du CBN de Brest (Figure 1), a été créé un « pôle habitats » (Delassus *et al.* 2009), ayant pour vocation d'améliorer la connaissance des végétations et des habitats des régions Basse-Normandie, Bretagne et Pays de la Loire.

C'est dans ce cadre que se place cette étude qui a pour but de tester "*la faisabilité d'une cartographie des grands types de végétation par télédétection sur plusieurs sites de Bretagne, Basse-Normandie et Pays de la Loire*". Réalisée dans le cadre d'un partenariat scientifique entre le CBN de Brest et l'UMR6554 CNRS LETG¹, elle repose sur la mise en commun des compétences d'une part du CBN de Brest en matière de phytosociologie et d'autre part du laboratoire LETG en traitement d'images et en cartographie.

L'étude bénéficie du soutien financier des partenaires institutionnels du CBN de Brest, et plus particulièrement des partenaires de son « pôle habitats » : Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) du territoire d'agrément du CBN, Régions de Basse-Normandie, de Bretagne et des Pays de Loire, agence de l'eau Seine-Normandie et Union européenne (fonds Feder).

¹ Unité mixte de recherche « Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique » (LETG) associant le CNRS et les Universités de Nantes (tutelle principale), Brest, Rennes 2 et Caen (tutelles secondaires).
<http://letg.univ-nantes.fr/fr/laboratoire/1/presentation>

Le CBN de Brest est agréé par l'Etat depuis 1990 comme Conservatoire Botanique National. Son territoire d'agrément s'étend approximativement sur les contours du Massif armoricain.



Le Conservatoire a 4 missions principales (article D416-1 du code de l'environnement) :

- une mission de connaissance de l'état et de l'évolution de la flore sauvage et des habitats naturels et semi-naturels,
- une mission d'identification et de conservation des éléments rares et menacés de la flore sauvage et des habitats naturels et semi-naturels,
- une mission d'assistance technique et scientifique de l'Etat, de ses établissements publics, des collectivités territoriales et de leurs groupements, en matière de flore sauvage et des habitats naturels et semi-naturels,
- une mission d'information et d'éducation du public à la connaissance et à la préservation de la diversité végétale.

Figure 1 : Présentation du CBN de Brest (Delassus *et al.* 2009)

2- OBJECTIF :

L'objectif de cette étude est d'évaluer les potentialités qu'offrent les images aériennes et satellitaires à haute et très haute résolutions spatiales pour la cartographie des grands types de végétation. Il vise ainsi à tester différents types de traitements numériques d'images et de données géographiques (analyse spatiale sous SIG...) afin de **produire un cadre méthodologique pour la cartographie de la végétation des régions Basse-Normandie, Bretagne et Pays de la Loire.**

La végétation correspond dans ce travail à la végétation actuelle, c'est-à-dire au « tapis végétal » (Thurmann 1949 *in* Géhu 2006) qui est observé dans les paysages présents (Géhu 2006). Elle peut être appréhendée à différents niveaux, d'un point de vue à la fois spatial et typologique, depuis les niveaux les plus fins (basés sur une description des cortèges d'espèces) jusqu'aux niveaux les plus agrégés (basés sur une description des types physiologiques de la végétation).

L'échelle retenue est le 1/25 000, qui semble un bon compromis entre l'échelle utilisée pour les cartes de terrain (~ 1/5 000) et l'échelle des cartes d'occupation du sol (~ 1/50 000). Toutefois, si la résolution des images le permet, nous ne nous priverons pas de classer les végétations à des échelles plus grandes.

Concrètement, il s'agit donc, dans ce travail, de déterminer quels sont les types d'images et de données, ainsi que les méthodes d'inventaire ou d'extraction les plus adaptés à la cartographie à différents niveaux typologiques des types de végétation de l'Ouest de la France. Plusieurs sites représentatifs de la diversité des végétations présentes sur ce territoire ont été retenus. A partir des résultats obtenus dans ces sites tests, l'étude propose plusieurs scénarios pour la cartographie des végétations à l'échelle régionale.

In fine, l'étude de faisabilité présentée ici propose, pour les différents types de végétation du territoire, une articulation entre les approches « terrain » et les démarches basées sur le traitement numérique de données géographiques. A la demande des DREAL, des Conseils Régionaux et de l'agence de l'eau Seine-Normandie, les cartes produites permettront de mettre en évidence ces grands types de végétation à l'échelle du 1/25 000, et les secteurs sur lesquels un effort en termes d'inventaire sera nécessaire. Plus globalement, elles nourriront la réflexion concernant les moyens à déployer pour mettre en œuvre un processus efficace d'amélioration des connaissances concernant la distribution spatiale des végétations. Elles pourront également servir de support à l'analyse des principaux enjeux s'appliquant à certains grands types de végétation au niveau régional.

Ce rapport est structuré en 4 parties :

- En première partie de ce rapport final, un état de l'art des travaux relatifs à la cartographie des grands types de végétation est établi,
- sont présentés dans la seconde partie les éléments de la méthode,
- suivis en troisième partie de la présentation et de la discussion sur les résultats des tests engagés sur les sites tests et de validation.
- et enfin la dernière partie présente un bilan et les perspectives d'améliorations.

PARTIE 1 :

Cartographie des végétations terrestres par télédétection : synthèse bibliographique

1- Les différents systèmes de classification de la végétation

1.1- Classifications utilisées aux niveaux national et international

Cette partie a pour but de référencer et décrire les typologies de la végétation actuellement en vigueur au niveau national et international (Tableau 1). Parmi ces typologies, seule la typologie phytosociologique concerne strictement des végétations (au sens communautés végétales). Les autres listant à la fois des végétations et des habitats.

Typologie	Date de la dernière version	Etendue d'application	Description
EUNIS habitats	2008	Europe	Concaténation des nomenclatures Corine Biotores et la classification paléarctique, et approfondissement de la classification des habitats marins et des habitats non définis par la flore.
National vegetation classification standard (FGDC)	2008	Amérique	Organisation de la classification en 8 niveaux hiérarchiques. Les végétations sont classées aux niveaux les plus fins en fonction de leurs compositions floristiques, et aux niveaux supérieurs en fonction de la physionomie.
Nomenclature Natura 2000	EUR27 : 2007 EUR15/2 : 1999	Europe	Référence les habitats rares, menacés ou représentatifs d'un territoire biogéographique qui doivent être préservés au sein de l'Union européenne
Cahiers d'habitats	2001-2005	France	Déclinaison française de la nomenclature Natura 2000
Classification paléarctique ²	1996	Domaine paléarctique	Même référence que Corine Biotope mais étendue à toute la zone paléarctique
Corine Biotope	1991	Europe de l'ouest	Référence les habitats naturels et semi-naturels avec une attention particulière portée aux habitats à forte valeur patrimoniale
Phytosociologique sigmatiste	1930 (début de son développement)	Monde	Référence les communautés végétales

Tableau 1 : Les typologies d'habitats en vigueur en Europe

La *classification phytosociologique européenne* développée en 1930, constitue l'un des piliers de la phytosociologie, discipline qui étudie les communautés végétales. Cette science des groupements végétaux, autrement dit des *syntaxons* (Géhu 2006 *in* Delassus et Magnanon 2012), est ordonnée en un système hiérarchisé où l'association végétale³ est l'unité élémentaire fondamentale.

² Le paléarctique correspond essentiellement aux écorégions terrestres de l'Europe, du nord de l'Asie (jusqu'au nord de l'Himalaya), de l'Afrique (au nord du Sahara) et une petite partie du Moyen-Orient. (Wikipedia, [En ligne]. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pal%C3%A9arctique> (Page consultée le 12 octobre 2011))

³ Selon Delassus et Magnanon (2012), c'est en 1910, lors du Congrès international de botanique de Bruxelles, que Flahaut et Schröter ont proposé la définition de l'*association végétale*, concept « clé de voûte » de la phytosociologie : "*Une association végétale est un groupement végétal de composition floristique déterminée, présentant une physionomie uniforme et croissant dans des conditions stationnelles également uniformes. L'association est l'unité fondamentale de la synécologie*".

Ce *synsystème* comprend des unités de rangs hiérarchiques progressivement plus élevés : associations, alliances, ordres, classes. Son développement s'est généralisé à partir des années 1930 sous l'impulsion de l'école züricho-montpelliéraine de J. Braun-Blanquet et plus tard de R. Tüxen (Delassus et Magnanon 2013). Elle est très souvent la base de productions cartographiques de la végétation réalisées sur le terrain et commence indirectement à être utilisée en traitement automatique d'images (Brunet et Renaud 2010). Cette classification est à la base de plusieurs typologies citées ci-après (Natura 2000, EUNIS et Corine Biotope). La classification phytosociologique fait actuellement l'objet d'un important travail de révision et d'actualisation, en liaison avec la préparation d'un *Prodrome des végétations de France*⁴, qui établira une liste organisée de l'ensemble des associations végétales rencontrées en France.

Corine Biotope est une classification d'habitats⁵ élaborée en 1991 et largement utilisée en Europe (Dorian et Barry 1991). Apparue peu après la classification des paysages *Corine Land Cover* (1990), elle a été établie dans le but de recueillir, de coordonner et d'assurer la cohérence à l'échelle européenne de l'information sur l'état de l'environnement et des ressources naturelles. Les habitats y sont classés selon des critères physiologiques (landes, forêts, pelouses, etc.) ou écologiques (habitats littoraux, tourbières et marais, rochers, éboulis, sables). Les niveaux inférieurs sont déterminés, de manière générale (mais pas toujours), en référence à la classification phytosociologique (Delassus et Magnanon 2012). De nombreuses études utilisant le traitement numérique d'images, se basent encore aujourd'hui sur ce système de classification (SIRS 2009 ; Giannetti *et al.* 2010 ; Renaud *et al.* 2010).

En 1996, la *classification paléarctique* a vu le jour et fait suite à la classification Corine Biotope. Elle comporte les mêmes classes mais est étendue à tout le domaine paléarctique.

La typologie *EUNIS* (*European Natura Information System*) est proposée par le *European Topic Centre on Biological Diversity* pour l'*European Environment Agency* (EEA) et l'*European Environmental Information Observation Network* (Eionet). Cette classification des habitats, inspirée de *Corine Biotope*, a été développée afin de faciliter l'harmonisation des descriptions et des collectes de données à travers l'Europe. C'est une concaténation puis une restructuration des classifications Corine Biotope et paléarctique⁶. Elle inclut par ailleurs les habitats marins et les habitats non définis par la flore. Elle est constituée de plusieurs niveaux hiérarchiques. Sa dernière actualisation date de 2008 et fait l'objet de mises à jour régulières. Elle fait actuellement référence au niveau européen (Olivier *et al.* 2010) et est utilisée dans certaines cartographies d'habitats par télédétection sur des petits sites au niveau 1 et 2 (Bock *et al.* 2003 et 2005) et au niveau 3 (Gourmelon *et al.* 2005).

⁴ Ce travail est coordonné par la Société Française de Phytosociologie en liaison avec le Muséum National d'Histoire Naturelle et avec de nombreux phytosociologues amateurs et professionnels.

⁵ Selon les cahiers d'habitats, l'habitat est un ensemble non dissociable constitué : d'un compartiment stationnel (conditions climatiques régionales et locales, matériau parental et sol, géomorphologie et leurs propriétés physiques et chimiques) et d'une végétation et d'une faune associée (avec des espèces inféodées à une espèce végétale, à la végétation, ou utilisant un territoire plus grand que l'habitat considéré).

⁶ Territoires biogéographique – Région Méditerranée [en ligne].
http://client.kaliop.com/phyto/presentation/typologie_eunis.asp (page consultée le 12 octobre 2011)

Parallèlement à l'émergence de ces trois systèmes de classification, la classification *Natura 2000* s'est imposée à partir de 1999, en liaison avec la mise en place de la directive européenne « Habitats-Faune-Flore » 94/43/CEE, instaurant le réseau *Natura 2000*. Cette classification concerne les habitats rares et menacés ou représentatifs d'un territoire biogéographique, identifiés comme devant être préservés au sein de l'Union européenne (Olivier *et al.* 2010). Elle est largement utilisée pour la cartographie des sites Natura 2000, que ce soit sur le terrain ou par traitement automatique d'image (Gianetti *et al.* 2010 ; Olsson 2010 ; Haest 2010).

La *classification du FGDC* (Federal Geographic Data Committee)⁷ correspond à un élargissement de la classification phytosociologique européenne. Elle est organisée en 8 niveaux hiérarchiques : les végétations y sont classées, aux niveaux les plus fins, en fonction de leurs compositions floristiques (associations et alliances phytosociologiques). Aux niveaux supérieurs, c'est la physionomie qui constitue le principal critère de discrimination des différents types de végétations (formations et classes de formations). Selon Delassus et Magnanon (2012), ce standard de classification de la végétation américaine (National vegetation classification standard, FGDC 2008) a été développé dans le but de produire des statistiques uniformes sur la végétation, basées sur des données de végétation partagées au niveau local, régional ou national. De cette classification en dérive une autre, celle utilisée dans le cadre d'un vaste programme de cartographie de la végétation des régions circumboréales (programme CBVM : Circumboreal vegetation map⁸) ; celle-ci comprend six niveaux du type de formation à l'association végétale.

1.2- Classifications utilisées sur le territoire d'étude

Les classifications européennes (Corine Biotope, EUNIS, Natura 2000) sont utilisées sur le territoire d'étude, notamment dans le cadre d'inventaires et de cartographies de sites. Néanmoins, ces classifications sont parfois incomplètes, imprécises et peu adaptées à l'échelle régionale. C'est pour palier les difficultés d'utilisation de ces typologies que le CBN de Brest a créé, en 2000, un « référentiel typologique des habitats de Basse-Normandie, de Bretagne et des Pays de la Loire »⁹. Basé sur la classification phytosociologique européenne, il rassemble la liste des syntaxons recensés dans ces régions (associations, alliances, ordres, classes phytosociologiques). Il fournit également la correspondance entre la classification phytosociologique et les autres classifications européennes utilisées sur ce territoire. Cette liste de référence est régulièrement mise à jour, en fonction des progrès des inventaires de terrain et des avancées du *Prodrome des végétations de France*.

Partant de cette liste de référence, et s'inspirant de la méthode américaine de classification des végétations (FGDC), le CBN de Brest a récemment établi (Delassus et Magnanon 2013) une classification « emboîtée » des végétations du territoire d'étude, organisée en 8 niveaux (Tableau 2),

⁷ FGDC: *Federal Geographic Data Committee*. Il s'agit d'un organisme fédéral américain qui promeut le développement coordonné, l'utilisation, le partage et la diffusion des données géospatiales sur une base nationale.

⁸ Présentation du projet CBMV [en ligne].

http://caffportal.arcticportal.org/images/Reports/Strategy%20Series/CBVM%20Final_13072011.pdf (page consultée le 12 octobre 2011)

⁹ Le référentiel fait l'objet d'une diffusion en ligne sur www.cbnbrest.fr

déterminés sur la base de critères physionomiques (formes architecturales et biologiques) pour les niveaux supérieurs, sur des critères floristiques pour les niveaux inférieurs et sur des critères physionomiques et floristiques pour les niveaux intermédiaires.

Niveau	Exemple des associations de mégaphorbaies oligohalophiles
Classe de formation	Végétations herbacées
Sous-classe de formation	Hémicryptophytaies
Formation	Franges et lisières
Division	Mégaphorbaies
Macrogroupe (~ classe phytosociologique)	Mégaphorbaies planitiales à montagnards (<i>Filipendulo ulmariae</i> - <i>Convolvuletea sepium</i>)
Groupe (~ ordre phytosociologique)	Mégaphorbaies alluviales (<i>Convolvuletalia sepium</i>)
Alliance	<i>Calystegio sepium</i> - <i>Althaeion officinalis</i> de Foucault 2011
Sous-alliance	
Association	<i>Althaeo officinalis</i> - <i>Calystegietum sepium</i> Beeftink 1965
Sous-association	

Tableau 2 : Classification de la végétation proposée pour les régions Basse-Normandie, Bretagne et pays de la Loire (Delassus et Magnanon 2013)

C'est sur cette classification de la végétation que se base le travail mené dans le cadre de cette étude.

En effet, dans l'ouest comme dans d'autres régions de France, les habitats, et plus particulièrement les végétations, constituent désormais l'ossature de nombreux programmes de connaissance et de préservation du patrimoine naturel, tels que la Trame Verte et Bleue, la Stratégie de Création des Aires protégées, les politiques de gestion des réserves naturelles, des espaces naturels sensibles des départements, etc. De ce fait, on assiste actuellement à une multiplication des demandes sur la nature et la répartition des habitats naturels et semi-naturels aux échelles locales et globales (Delassus et Magnanon 2012). Celles-ci portent généralement sur la localisation, la dynamique, l'état de conservation, le niveau de rareté ou de menace des communautés végétales sur un territoire donné. De plus en plus, il est donc nécessaire de s'orienter vers la cartographie de territoires relativement vastes, tels que régions et inter-régions. Le besoin d'établir une nouvelle typologie, adapté aux traitements automatiques d'image et permettant d'inventorier la végétation du niveau local au niveau global, fait ainsi son apparition en France. Dans cette perspective, les CBN du Massif central, Alpin (Mikolajczak 2009) et le CBN de Brest (Delassus et Magnanon 2013) se sont employés à mettre au point, pour leurs territoires d'intervention respectifs, une classification intégrant des critères physionomiques, écologiques et floristiques. Cette nouvelle approche paraît en effet particulièrement adaptée à l'étude de la végétation par traitement automatique d'image, et à la recherche d'une articulation entre les techniques de cartographie basées sur une approche « terrain » et celles faisant appel à des traitements d'images et de données numériques.

2- Les approches cartographiques à base d'images

Pour réaliser cet état de l'art, nous nous sommes intéressés essentiellement aux études qui utilisent l'approche orientée-objet à partir d'imagerie aérienne et satellitaire afin d'extraire les

grands types de végétation. Afin d'expliciter notre choix de s'intéresser à cette méthode plutôt qu'à une autre, un bref aperçu de l'évolution des techniques de traitements de l'image est présenté.

2.1- Historique de l'évolution des images et des traitements

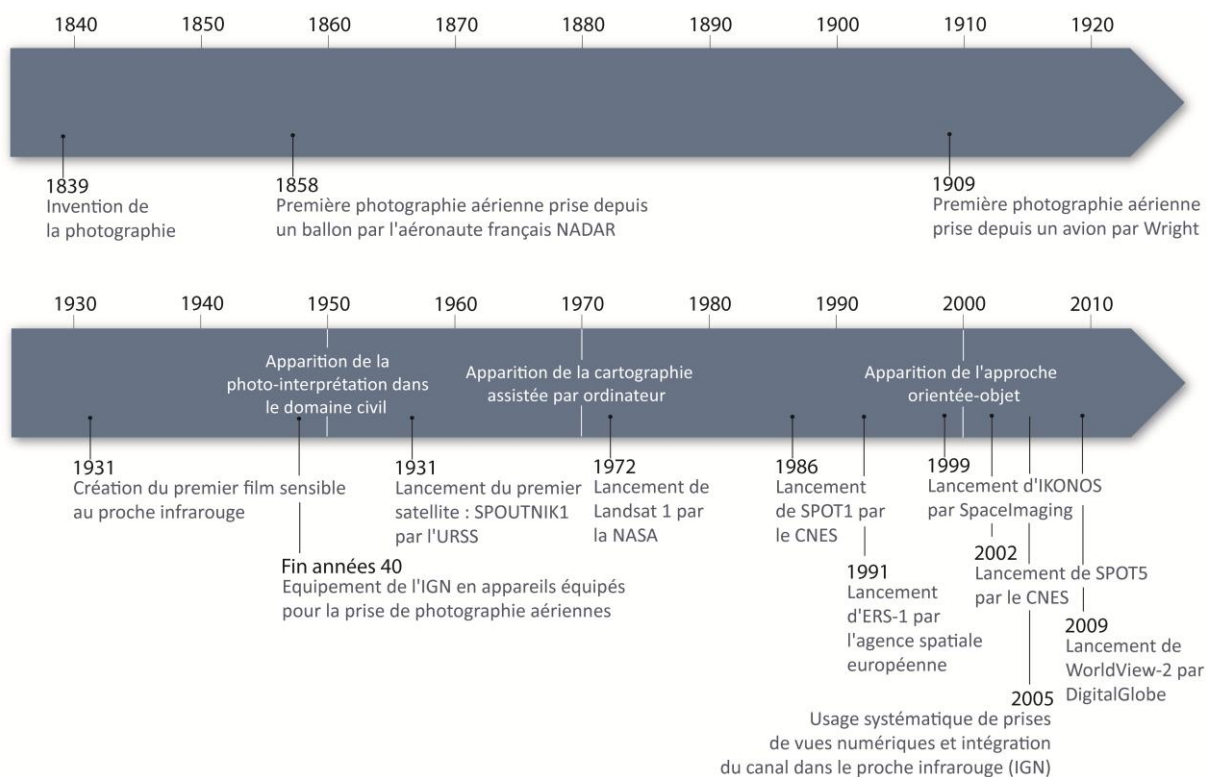


Figure 2 : Evolution des techniques d'imagerie de 1839 à aujourd'hui

2.2- La photo-interprétation

L'invention de la photographie date de 1839, mais c'est en 1858 que la première photographie aérienne est prise depuis un ballon positionné au dessus de Paris par G.F. Tournachon dit NADAR (Bonn et Rochon 1992). Dès lors, la technique n'a cessé d'évoluer, favorisée par le développement de l'aviation. Dans un premier temps, les photographies ont servi à la couverture topographique puis dans les années 1950, lorsque la photo-interprétation ne fut plus réservée aux militaires, elle fut utilisée pour cartographier l'occupation du sol (Steinberg 2000). La photo-interprétation a aussi utilisé comme support les images satellitaires dès leur apparition dans les années 1970. Cette technique est encore utilisée aujourd'hui (Tableau 3), pour cartographier les grands types de végétation à partir d'images satellitaires (Gourmelon *et al.* 2005) ou de photographies aériennes (AESN 2006 ; IFN 2008 ; SIRS 2009 ; GIP Loire estuaire 2012), seule ou en appui aux méthodes de classification automatique.

Depuis 2005, l'Institut National Géographique (IGN) a ajouté, pour toutes les nouvelles prises de vue d'ortho-images¹⁰, un canal dans le proche infrarouge. Cette initiative devrait permettre de

¹⁰ Une ortho-images est une image aérienne ou satellitaire de la surface terrestre rectifiée géométriquement et égalisée radiométriquement. Elle peut être géoréférencée dans n'importe quel système de coordonnées.

Auteur(s)	Type d'image	Informations supplémentaires	Typologie	Nombre de classes	Type d'information cartographiée	Méthode de classification	Performance globale
Gourmelon et al. 2005	SPOT5	BDOrtho (50cm, août 2000), BDTopo	EUNIS (niveau3)	15 classes	Habitats (1/10 000)	photointerprétation/classification non supervisée (GéolImage)	50% de pixels correctement classés
Agence de l'eau Seine-Normandie 2006	Orthophotoplans	Relevés de terrains, Landsat ETM+, Scan25, BdScan-Geol50, BDCarthage	Typologie propre avec correspondances EUNIS et Corine Biotope	2 classes (humide/non humide) 8 classes (niveau1) 16 classes (niveau2)	Occupation du sol	photointerprétation	95% de zones à dominante humide correctement délimitées
Fuller et al. 2006	IKONOS	Relevés de terrain, cartes du National Wetland Inventory (NWI)		2 classes (humides/non humide)	Occupation du sol	Méthode pixel supervisée (MaxLike) et non supervisée et photointerprétation	?
IFN, 2008	BDOrtho IRC	BDOrtho, SCAN25, anciennes cartes	Typologie nationale de l'IFN	2 classes (niveau1) 5 classes (niveau2) 16 classes (niveau3) 31 classes (niveau4)	Occupation du sol et habitats forestiers	Orientée-objet (fond vert) puis photointerprétation (enrichissement thématique)	/
SIRS, 2009	Orthophotographie aériennes RVB et IR	Cartes géologiques, cartes pédologiques, données de la trame verte et bleu, données sur les haies, BDD occupation du sol	Corine biotope (niveau 3)	34 classes (niveau1) 38 classes (niveau2)	Habitats (1/10 000)	photointerprétation et orientée-objet	/
Olsson 2010	Photographies aériennes SPOT	?	Natura 2000		Habitats	Photointerprétation, Orientée-objet	?
GIP Loire estuaire 2012	BDOrtho IRC	aucune	Niveau 1 : grandes formations végétales Niveau 2 : grands habitats estuariens (référence Corine biotope)	Photointerprétation : 16 classes (niveau 1) 26 classes (niveau 2) Classification pixel : 7 classes (niveau 1) Classification objet : 9 classes (niveau1)	Habitats	Photointerprétation (ArcGis) et Classification supervisée pixel (ERDAS) et Classification supervisée objet (ENVI)	Photointerprétation : 74% (niveau 1) 60% (niveau 2) Classification pixel : 51% Classification objet : 57%

Tableau 3 : Recensement des études de cartographie des grands types de végétation par photo-interprétation

mener des études sur la végétation à partir de ce type de données, mais pour l'instant il y a peu de publications sur le sujet. Depuis 2009 cependant, un projet européen de coopération transfrontalier ARCH¹¹ (Assessing Regional Changes to Habitats) a débuté. Sa finalité est "*d'améliorer la manière dont les habitats naturels sont préservés et restaurés dans le Kent et la région Nord-Pas de Calais*" (SIRS 2009). Les régions du Kent et du Nord-Pas-de-Calais ont réalisés en 2012, la production d'une cartographie des habitats naturels à deux dates (2005 et 2009), sur le territoire du Kent et la région Nord Pas-de-Calais. La première phase de ce travail consiste en la photo-interprétation des habitats au 1/5 000, d'images aériennes en IRC¹².

De nombreuses études ont déjà présenté les limites de la photo-interprétation qui fournit en effet des résultats hétérogènes, car produits par plusieurs opérateurs à des périodes différentes, avec des délais de traitements importants qui limitent la périodicité des mises à jour (Gourmelon *et al.* 2005 ; Sparfel *et al.* 2008 ; Tuxen *et al.* 2008 ; Medcalf *et al.* 2011 ; Vanden-Borre *et al.* 2011).

2.3- Les méthodes de classification automatique

Les techniques assistées de traitements d'images ont pris leur essor depuis le lancement de Landsat 1 par la NASA (1972). Dans ce cadre, une acquisition massive d'images a été réalisée afin d'améliorer les connaissances des ressources terrestres (Couzy 1981). S'ensuit en 1986 le lancement du satellite SPOT1 par le CNES et d'autres satellites d'observation de la terre caractérisés par une amélioration progressive des résolutions spatiale et spectrale des images acquises (Vanden-Borre *et al.* 2011). Depuis le lancement du satellite SPOUTNIK en 1931, plus de 5000 satellites ont été lancés et actuellement près de 600 sont actifs (Girard et Girard 2010). La complexification et la quantité de données à traiter étant devenues très importantes, les moyens pour les traiter ont évolué (Vander-Borre *et al.* 2011).

2.3.1- La méthode pixel

Cette méthode a pour principe d'attribuer chaque pixel de l'image à une classe en fonction de ses valeurs spectrales. Elle est apparue dans les années 70 et est encore utilisée pour la cartographie de vastes territoires (Moré *et al.* 2005 ; Roche *et al.* 2010) ou d'un type de végétation particulier (Sanchez-Hernandez *et al.* 2007 ; Ouyang *et al.* 2011) (Tableau 4). Cette méthode est cependant progressivement supplantée par la méthode orientée-objet, apparue dans les années 2000 et plus adaptée à la nature des images délivrées actuellement. En effet l'évolution des capteurs est telle que les images acquises contiennent une donnée de plus en plus complexe à traiter, d'où la mise au point de techniques de traitement adaptées (Oruc *et al.* 2004).

¹¹ Présentation du projet ARCH [En ligne]. http://www.archnature.eu/index_fr.html (page consultée le 28 novembre 2012)

¹² Présentation des résultats du projet ARCH [En ligne]. <http://www.arch.nordpasdecals.fr/> (page consultée le 15 janvier 2013)

2.3.2- L'approche orientée-objet

L'approche orientée-objet est apparue dans les années 2000 et connaît une progression croissante de son utilisation liée aux améliorations techniques (Tableau 5).

Méthode pixel	Approche orientée-objet
Classification "poivre et sel"	Classification en objets homogènes spatialement connectés et correspondant à des objets du monde réel.
Classification basée sur les valeurs spectrales des pixels	Classification basée sur des critères spectraux, texturaux, de forme et de voisinage
Travail à une échelle spatiale	Travail à plusieurs échelles spatiales
Pas d'intégration possible de données vectorielles	Intégration possible de données vectorielles

Tableau 5 : Comparaison de la méthode pixel et de l'approche orientée-objet

Son principe est de regrouper des pixels similaires en objets que l'on classe sur la base de critères spectraux, texturaux, de forme et de voisinage (Bock *et al.* 2005 ; Gao et Mas 2008) (Figure 3).

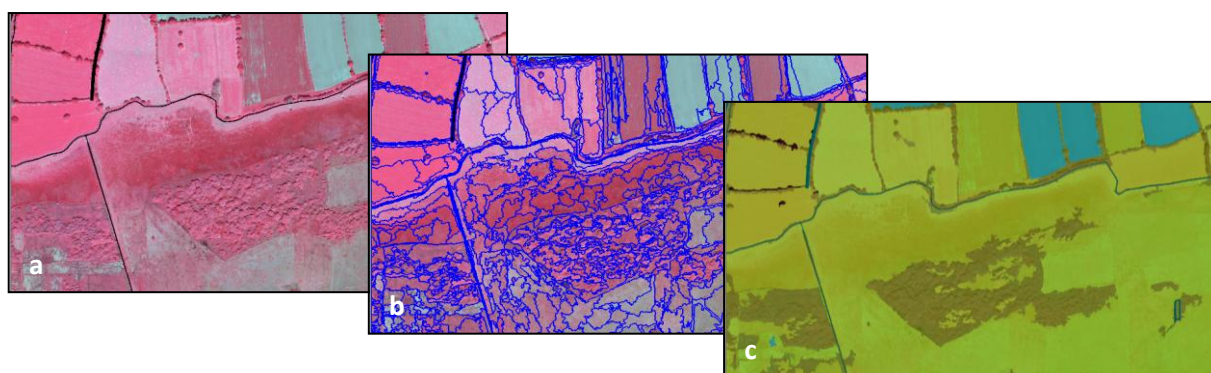


Figure 3 : Les principales étapes de l'approche orientée-objet
(a : image brute ; b : image segmentée en objets ; c : les objets de l'image sont classés)

Avec l'amélioration progressive de la qualité spectrale et spatiale des images aériennes (IRC) et satellitaires ainsi que l'évolution de l'approche orientée-objet, de nombreuses études de cartographie de la végétation par traitement automatique d'images ont été menées depuis (Tableau 6). Elles sont réalisées en France et dans plusieurs pays d'Europe, soit au niveau d'un territoire (SIRS 2009 ; Allenbach *et al.* 2010 ; Lucas *et al.* 2011), soit sur un grand type de milieu en particulier : les forêts (Triepke *et al.* 2008 ; Eisfelder *et al.* 2009 ; Renaud *et al.* 2010 ; IFN 2008), les prés salés (Tuxen *et al.* 2008 ; Ouyang *et al.* 2011) et les zones humides (Hubert-Moy *et al.* 2006 ; Frohn *et al.* 2009, Rapinel 2012). Leurs résultats attestent de l'intérêt de l'approche orientée-objet. On peut citer la mise à jour de la carte des habitats du Pays de Galles (Lucas *et al.* 2011) qui s'appuie sur 4 types d'images satellitaires (SPOT, IRS LISS III, Landsat, ASTER) acquises à des saisons différentes, et sur diverses données complémentaires (modèle numérique de terrain, occupation du sol, infrastructures, milieux aquatiques, côte...). La typologie se décompose en 10 classes et 103 sous-classes correctement classés à plus de 80%.

Enfin, il faut souligner que les typologies basées sur la structure de la végétation et faisant le lien avec la phytosociologie, telles que celles développées par le FGDC (2008) sont particulièrement adaptées à l'approche orientée-objet et aux études multi-scalaires. En effet, cette approche allie la

Auteur(s)	Type d'image	Informations supplémentaires	Typologie	Nombre de classes	Type d'information cartographiée	Méthode de classification	Performance globale
Willhauck 2000	SPOT photographies aériennes	Carte de végétation digitalisé à partir de photos aériennes, GIS data (infrastructures, waterbodies)	Typologie propre	3 classes	Occupation du sol	Orientée-objet (eCognition) et méthode pixel (MaxLike)	Pixel-based (SPOT) K=93,21 Object-oriented (SPOT) K=96,09
Bock 2003	Landsat 5 IRS-1C PAN	Carte de végétation (1/10 000 et 1/2 500), carte du sol (1/10 000), carte des sols marécageux	Nomenclature de la carte des végétations de 1995	21 classes	Habitats des prairies humides et des landes	Méthode pixel (ISODATA, MaxLike), Orientée-objet (ERDAS)	objects of 0,5ha : 40-60% objects of 0,7ha : 80%
Lacroix et al. 2003	Orthophotoplans		Typologie propre	1/25 000 : 19 classes 1/5 000 : 36 classes	Végétations littorales	Méthode pixel	?
Mehner et al. 2004	IKONOS		Typologie propre	15 classes	Habitats d'altitude	méthode pixel non supervisée (IsoData)	Image été K = 78,7% Image hiver K = 49,9%
Belluco et al. 2005	ROSIS CASI MIVIS IKONOS Quickbird	Données de terrain de référence	Typologie propre	6 classes	Habitats des prés salés	Méthode pixel supervisée (maximum likelihood, spectral angle mapper), et non supervisée (K-means)	Très bon résultats
Moré et al. 2005	Landsat 7 Landsat 5 orthophotographies	Cartes climatiques, cartes orographiques, carte des habitats de Catalogne	Corine biotope	34 classes	Habitats	méthode pixel non supervisée (IsoData)	85%
Fuller et al. 2006	IKONOS	Relevés de terrain, cartes du National Wetland Inventory (NWI)		2 classes (humides/non humide)	Occupation du sol	Méthode pixel supervisée (MaxLike) et non supervisée et photointerprétation	?
Backer et al. 2006	Landsat 7	DEM, Carte des pentes, données hydriques sur les sols	Typologie propre	3 classes	Occupation du sol	Méthode pixel supervisée (SGB, CTA)	SGB : 86% CTA : 73,1%
TBM, 2007	Orthophotographie RVB	?	Typologie du CBN (phytosociologique? ou Natura 2000? ou grands types de milieux?)	non précisé	Habitats	méthode pixel non supervisée (IsoData)	Note : 9/20
Sanchez-Hernandez et al. 2007	Landsat 7	Photographie aériennes	Typologie propre	8 classes	Occupation du sol	Méthode pixel supervisée (SVM, SVDD) et non supervisée (MaxLike)	MaxLike = 64,8% SVM = 92% SVDD = 95,2%

Tableau 4 : Recensement des études de cartographie des grands types de végétation par la méthode pixel

Roche et al. 2010	ASTER	Couche géologique, couche d'insolation (intensité solaire, relié à la topographie)	Typologie locale (CBN de Porquerolles)	12 classes	Occupation du sol (1/25 000)	Orientée-objet (ENVI) et méthode pixel (classification supervisée (ERDAS) et méthode des arbres de classification (IDRISI))	Orienté-objet : mauvais Pixel : K = 0,685
Roche et al. 2010	ASTER	Couche des types de formation végétale	Typologie propre d'après relevé par placettes sur le terrain	Var : 5 formations végétales+14 formations arbustives Bouches-du-Rhône : 5 formations végétales+5 formations arbustives	Habitats forestiers	Méthode pixel (méthode par maximum de vraisemblance (Var), méthode par arbres de classification (Bouches-du-Rhône))	Var : K = 0,977 Bouches-du-Rhône : K = 0,928
Brunet et al. 2010	SPOT 5 Landsat 7	Géologie, MNT, carte de végétation	Typologie physiologique compatibles avec la typologie Natura 2000	19 classes	Habitats	Méthode pixel classification supervisée et non supervisée	?
Ouyang et al. 2011	Quickbird	Données de terrain	Typologie propre	3 classes	Habitats	Orientée-objet (Membership functions, Nearest neighbor) et méthode pixel (Nearest neighbor, Maximum likelihood, Membership functions)	78% à 87% (K = 0,64 à 0,76)
GIP Loire estuaire 2012	BDOrtho IRC	aucune	Niveau 1 : grandes formations végétales Niveau 2 : grands habitats estuariens (référence Corine biotope)	Photointerprétation : 16 classes (niveau 1) 26 classes (niveau 2) Classification pixel : 7 classes (niveau 1) Classification objet : 9 classes (niveau1)	Habitats	Photointerprétation (ArcGis) et Classification supervisée pixel (ERDAS) et Classification supervisée objet (ENVI)	Photointerprétation : 74% (niveau 1) 60% (niveau 2) Classification pixel : 51% Classification objet : 57%

Tableau 4 (suite) : Recensement des études de cartographie des grands types de végétation par la méthode pixel

Auteur(s)	Type d'image	Informations supplémentaires	Typologie	Nombre de classes	Type d'information cartographiée	Méthode de classification	Performance globale
Willhauck 2000	SPOT photographies aériennes	Carte de végétation digitalisé à partir de photos aériennes, GIS data (infrastructures, waterbodies)	Typologie propre	3 classes	Occupation du sol	Orientée-objet (eCognition) et méthode pixel (MaxLike)	Pixel-based (SPOT) K=93,21 Object-oriented (SPOT) K=96,09
Bock 2003	Landsat 5 IRS-1C PAN	Carte de végétation (1/10 000 et 1/2 500), carte du sol (1/10 000), carte des sols marécageux	Nomenclature de la carte des végétations de 1995	21 classes	Habitats des prairies humides et des landes	Méthode pixel (ISODATA, MaxLike), Orientée-objet (ERDAS)	objects of 0,5ha : 40-60% objects of 0,7ha : 80%
Bock 2005	Regional scale (Landsat 7), local scale (ASTER Stereo camera scanner (HRSC) Quickbird)	Carte du sol (1/200 000), ATKIS (zones construites), BNTK (occupation du sol), données de terrain	EUNIS (niveau 1 - Allemagne) EUNIS (niveau 2 - Angleterre)	Allemagne : 10 classes (régional), 21 classes (local) Angleterre : 8 classes (local)	Habitats	Orientée-objet (eCognition) classification supervisée et non supervisée	86,2% (Allemagne) 80,7% (Angleterre)
Bock 2005	Landsat 7	NDVI, Carte du sol (1/200 000), Données topographiques, données de terrain (2002 et 2003)	EUNIS (niveau 1)	9 classes	Habitats	Orientée-objet (eCognition)	86,19% (K = 0,80)
Bock 2005	Stereo camera scanner (HRSC)	DSM (digital surface model), Carte du sol (1/200 000), Données topographiques, données de terrain (2002 et 2003)	EUNIS (niveau 1)	9 classes	Habitats	Orientée-objet (eCognition)	précision globale augmente avec l'augmentation de la résolution spectrale et spatiale
Lewinski et al. 2005	ASTER	?	Typologie propre basée sur Corine Biotope	19 classes	Occupation du sol (1/25 000)	Orientée-objet (eCognition) classification supervisée et non supervisée	86,30%
Hubert-Moy et al. 2006	SPOT5	DEM, réseau hydrographique, données de terrain de référence	Corine biotope	2 classes (humide/non humide) 6 classes	Occupation du sol	Orientée-objet (eCognition) NN (Nearest neighbour) et MF (Membership functions)	55% des zones humides correctement délimitées. 62% des classes sont bien identifiées.
Lucas et al. 2007	Landsat 7	Données de terrain, photographies aériennes	Typologie propre défini par la Countryside Council of Wales (CCW)	11 classes	Habitats	Orientée-objet (eCognition) classification supervisée	84,90%
IFN, 2008	BDOrtho IRC	BDOrtho, SCAN25, anciennes cartes	Typologie nationale de l'IFN	2 classes (niveau1) 5 classes (niveau2) 16 classes (niveau3) 31 classes (niveau4)	Occupation du sol et habitats forestiers	Orientée-objet (fond vert) puis photointerprétation (enrichissement thématique)	/
Triepke et al. 2008	Landsat 7	Relevés de terrain de la base Ecodata (1993-1998), précipitations, solar insolation est-west, near-IR, solar insolation north-south, land type, potential végétation, elevation, mid-IR	Typologie propre	9 alliances 24 associations	Habitats forestiers	Orientée-objet (eCognition) Fuzzy classification pour les niveaux élevés, NN classification pour les niveaux plus fins	59% (alliances) 67% (associations)
Tuxen et al. 2008	Photographie aériennes IRC LIDAR	Données de terrain	Typologie propre	9 classes	Habitats des prés salés	Orientée-objet (eCognition) NN (Nearest neighbour)	K=85%

Tableau 6 : Recensement des études de cartographie des grands types de végétation par approche orientée-objet

Mallinis et al. 2008	Quickbird	Données de terrain	Typologie propre	7 classes (zones de couverture d'espèces similaires) 3 classes (couverture de la canopée) 12 classes (niveau 3)	Habitats forestiers	Orientée-objet (eCognition) NN (Nearest neighbour)	NN algorithm (1er niveau, K=52,74% 4ème niveau K=58,10%) CART analysis (1er niveau, K=73,63% 2ème niveau K=63,69%) LISA (1er niveau, K=78,11% 2ème niveau K=64,25%)
Varela et al. 2008	Landsat 5	DEM, données de terrain	Typologie propre	15 classes regroupées en 9 classes	Habitats montagnards	Orientée-objet (eCognition et ERDAS) classification supervisée et non supervisée	44% à 59% (pixel à objet)
Kamagata et al. 2008	IKONOS	Carte de végétation	Typologie propre	2 classes (niveau1) 4 classes (niveau2) 5 classes (niveau3) 7 classes (niveau4)	Habitats	Orientée-objet (eCognition)	Pixel : 52,8% Objet (spectral) : 58,9% Objet (spectral+additional features) : 65%
Förster et al. 2008	Quickbird	DEM, Soil map, Silvicultural map, aerial photographs	Typologie propre	8 classes	Habitats forestiers	Orientée-objet (eCognition) classification non supervisée	Avec données auxiliaires Niveau 1 : 0,77 Niveau 2 : 0,75 Sans données auxiliaires Niveau 1 : 0,64 Niveau 2 : 0,70
SIRS, 2009	Orthophotographie aériennes RVB et IR	Cartes géologiques, cartes pédologiques, données de la trame verte et bleu, données sur les haies, BDD occupation du sol	Corine biotope (niveau 3)	34 classes (niveau1) 38 classes (niveau2)	Habitats (1/10 000)	photointerprétation et orientée-objet	/
Eisfelder et al. 2009	SPOT5 IKONOS	DSM (digital surface model), carte des forêts de 2005, Carte d'occupation du sol (BNTK 2002, 1/10 000), DEM	Typologie propre	3 classes	Habitats forestiers	Orientée-objet (eCognition)	SPOT5 91,9% (K = 0,88) IKONOS 88% (K = 0,84)
Schwarzer et al. 2009	SPOT 5	?	Typologie propre compatible avec les standard Suisse et Européen (OTEMO et CORINE)	6 classes (ordre 1) 27 classes (ordre 2)	Occupation du sol (1/20 000)	Orientée-objet (eCognition)	K=89%
Frohn et al. 2009	Landsat 7	Buffered hydrology and lake, USGS hydrography dataset (NHD)	Typologie propre	2 classes (zones humides isolés/zones humides non isolés)	Occupation du sol	Orientée-objet (eCognition) classification supervisée	Zones humides sup 0,20ha (88%) Zones humides sup 0,81ha (97%)
Renaud et al. 2010	SPOT5 IRC	BDOrtho Cartographie IFN, cartographie d'habitats, relevés floristiques, BDAlti, BDORTHORVB, variables climatiques (AURELHY)	Corine biotope	4 classes (niveau1) 16 classes (niveau2)	Habitats forestiers	Orientée-objet (classification supervisée : niveau 1, classification non supervisée : niveau 2)	K = 0,86 (niveau1) K = 0,51 (niveau2)

Tableau 6 (suite) : Recensement des études de cartographie des grands types de végétation par approche orientée-objet

Allenbach et al. 2010	SPOT5	Couches dérivée du MNT (IGN), distances aux rivières	Typologie des milieux naturels de Delarze et Gonzeth (2008), Corine biotope, Natura 2000	5 classes (niveau1) 15 classes (niveau2) 44 classes (niveau3)	Habitats (1/10 000)	Orientée-objet (eCognition) classification non supervisée	K = 0,9
Roche et al. 2010	ASTER	Couche géologique, couche d'insolation (intensité solaire, relié à la topographie)	Typologie locale (CBN de Porquerolles)	12 classes	Occupation du sol (1/25 000)	Orientée-objet (ENVI) et méthode pixel (classification supervisée (ERDAS) et méthode des arbres de classification (IDRISI))	Orienté-objet : mauvais Pixel : K = 0,685
Ota et al. 2010	IKONOS	DEM, NDVI	Typologie propre	3 classes	Habitats forestiers	Orientée-objet (eCognition) classification supervisée (CART)	K = 0,85 à 0,95
Bourget et al. 2010	Landsat 7	Données altimétrique dérivée du MNT	Typologie propre (structure des paysages)	16 classes	Occupation du sol (1/25 000)	Orientée-objet (eCognition) NN (Nearest neighbour)	?
Gianetti et al. 2010	IKONOS Quickbird	Geologic data, DEM, soil map	Corine biotope, Natura 2000		Habitats	Orientée-objet (eCognition)	?
Olsson 2010	Photographies aériennes SPOT	?	Natura 2000		Habitats	Photointerprétation, Orientée-objet	?
Sparfel et al. 2011	SPOT5	Orthophoto RVB, Orthophoto IRC (sept. 2004), données de terrain de référence, BDCarthage	Typologie propre, correspondance avec CLC, IPLI	5 classes(1/500 000ème) 14 classes(1/100 000ème) 22 classes(1/25 000ème)	Occupation du sol	Orientée-objet (eCognition) classification non supervisée	88,5% (niveau1 K = 85%) 78,7% (niveau2 K = 76%) 75,1% (niveau3 K = 74%)
Lucas et al. 2011	SPOT 5 IRS LISS 3 Landsat ASTER	DEM, LPIS (Land Parcel Information Service), OS Mastermap urban, water body data, coastal mask.	Typologie propre défini par la Countryside Council of Wales (CCW)	10 classes 103 sous-classes	Habitats	Orientée-objet (eCognition)	supérieure à 80%

Tableau 6 (suite) : Recensement des études de cartographie des grands types de végétation par approche orientée-objet

possibilité d'exploiter les informations spectrales de l'image ainsi que les critères visuels de la photo-interprétation que sont la texture, la forme, la couleur, le voisinage des objets. L'apport d'informations complémentaires (matricielles ou vectorielles), permettent dans certains cas d'affiner encore la typologie.

Le projet de grande envergure Circumboreal vegetation map (CBMV) s'inscrit dans cette démarche (Talbot et Meades 2011). Il utilise le traitement automatique et une typologie emboîtée basée sur la structure de la végétation dans le but de produire une carte de la région circumboréale à l'échelle du 1/7 500 000. De nombreuses applications nationales de ce programme ont été présentées lors du 20ème groupe de travail du *Européan Vegetation Survey* (EVS) en avril 2011¹³, et attestent de l'intérêt du couplage entre une typologie emboîtée et les techniques de traitement d'image (SAPIENZA-UNIVERSITA DI ROMA 2011).

2.4- Conclusion

Depuis les années 1990 dans le monde, la demande des politiques est croissante en matière de connaissance de la végétation dans un contexte de gestion de la biodiversité. Ce constat est attesté par l'évolution des typologies de plus en plus complètes et harmonisées au niveau européen (Figure 4).

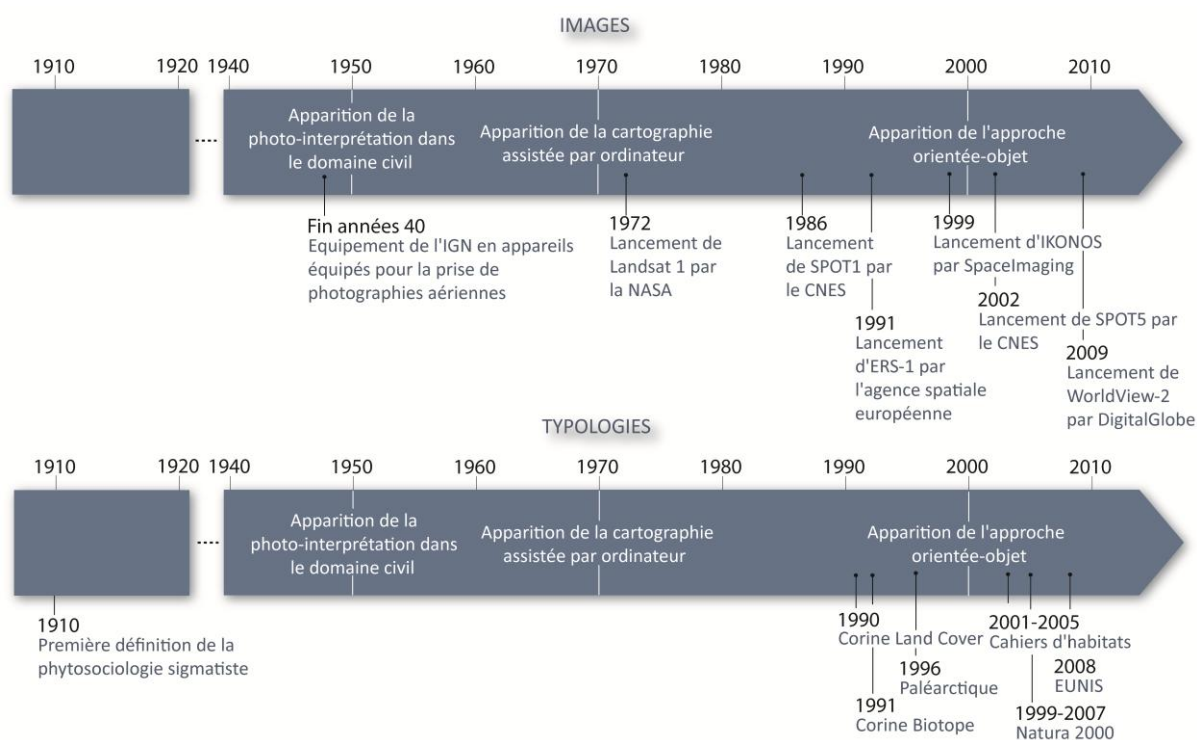


Figure 4 : Evolution des techniques de cartographie des végétations par traitements d'images et des typologies de la végétation

¹³ European Vegetation Survey-Italia [en ligne]. <http://www.evsitalia.eu/> (page consultée le 09 novembre 2011)

De façon concomitante, on assiste depuis les années 70 à une évolution très rapide de la qualité de l'imagerie aérienne et satellitaire et de leurs techniques de traitement. Cette évolution technologique et la demande croissante des politiques en matière de connaissances des habitats naturels et semi-naturels, à divers niveaux scalaires du local au régional, nous conduisent à tester les capacités des techniques les plus récentes en matière de traitement d'image pour cartographier la végétation.

Pour ce faire, nous proposons de nous appuyer sur une typologie adaptée à la cartographie des végétations par traitements automatiques, telle que celle développée par le FGDC et dont le programme de cartographie des végétations circumboréales s'inspire. Une telle typologie, basée sur une classification emboîtée, dans laquelle les niveaux supérieurs sont définis en fonction de la physionomie de la végétation et les niveaux les plus fins selon la composition floristique de la végétation, a été élaborée par le CBN de Brest pour la zone concernant cette étude.

PARTIE 2 : Méthodologie

Dans cette partie, nous présenterons la méthodologie, la typologie, les sites d'étude, les données utilisées et les traitements appliqués aux différents types d'image.

1- La méthodologie

Le diagramme présenté en figure 5 reprend les grandes étapes du projet, depuis nos premières réflexions méthodologiques (janvier 2011) jusqu'aux résultats (décembre 2012).

2- La typologie

Pour les besoins de ce projet, il était nécessaire de disposer d'une typologie qui intègre les différentes échelles de description de la végétation (Annexe 1). La classification emboîtée élaborée par le CBN de Brest permet d'articuler la typologie phytosociologique utilisée sur le terrain, avec des typologies de structure de la végétation, exploitables par des approches satellitaires et plus abordables par les non spécialistes de l'étude des communautés végétales. Elle est basée sur une double approche :

- Les niveaux supérieurs (niveaux les plus larges) sont basés sur des critères physionomiques (structuraux), c'est-à-dire sur des caractères morphologiques, extérieurement visibles et directement observables, des groupements végétaux (Delassus et Magnanon 2013). Les critères pris en compte peuvent être les formes architecturales, les formes biologiques, les classes de hauteurs, les types de feuilles, le type de pollinisation et de dissémination, etc. Les groupes écologiques ou les éléments de phytogéographie ne sont pas considérés comme des caractères morphologiques.
- Les niveaux inférieurs sont basés sur des critères floristiques (comparaison de la composition spécifique), tels que pratiqués dans la typologie phytosociologique Braun-Blanquetienne.

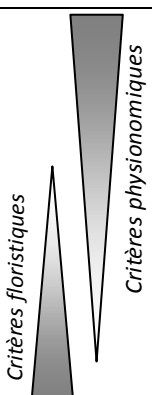
Niveau	Critère	Exemple
Classe de formation		Forêts
Sous-classe de formation		Forêts caducifoliées
Formation		Forêts caducifoliées (des régions tempérées)
Division		Forêts mésophiles à mésohygrophiles
Macrogroupe (~ Classe)		Forêts neutro-acidiclines à calcicoles
Groupe (~ Ordre)		Hêtraies et chênaies neutro-acidiclines à calcicoles
Alliance		Hêtraies du <i>Carpinion betuli</i> Issler 1931
Association		<i>Daphno laureolae-Fagetum sylvaticae</i> Durin et al. 1967

Figure 6 : Influence des critères floristiques et physionomiques sur la classification

Le lien entre les niveaux morphologiques et floristiques se fait aux niveaux intermédiaires. La classification concernant les végétations naturelles et semi-naturelles est construite selon le principe d'une démarche ascendante : elle part des associations végétales pour les replacer dans des unités de plus en plus globalisantes au fur et à mesure qu'on « monte » dans la classification (Figure 6). L'objectif de l'étude étant une cartographie au 1/25 000, elle implique une identification des végétations des niveaux de la classe de formation au macrogroupe.

3- Présentation des sites d'étude

La méthodologie a été mise au point sur trois sites tests, puis expérimentée dans un quatrième site, dit « site de validation ». Plusieurs paramètres ont été pris en compte dans le choix des sites tests :

- La disponibilité en cartographies fines et récentes : Il est en effet nécessaire de posséder pour le calibrage de la méthode de cartes précises (1/5 000), réalisées sur le même pas de temps que les images afin de pallier d'éventuels problèmes liés à l'évolution de la végétation (Tableau 7).
- La diversité du site en grands types de milieux. Des tests d'identification doivent en effet être menés sur un maximum de classes afin de conclure objectivement sur la reproductibilité de la méthode.
- La répartition des sites sur les différentes régions du territoire d'agrément.



Figure 7 : Localisation des sites d'étude

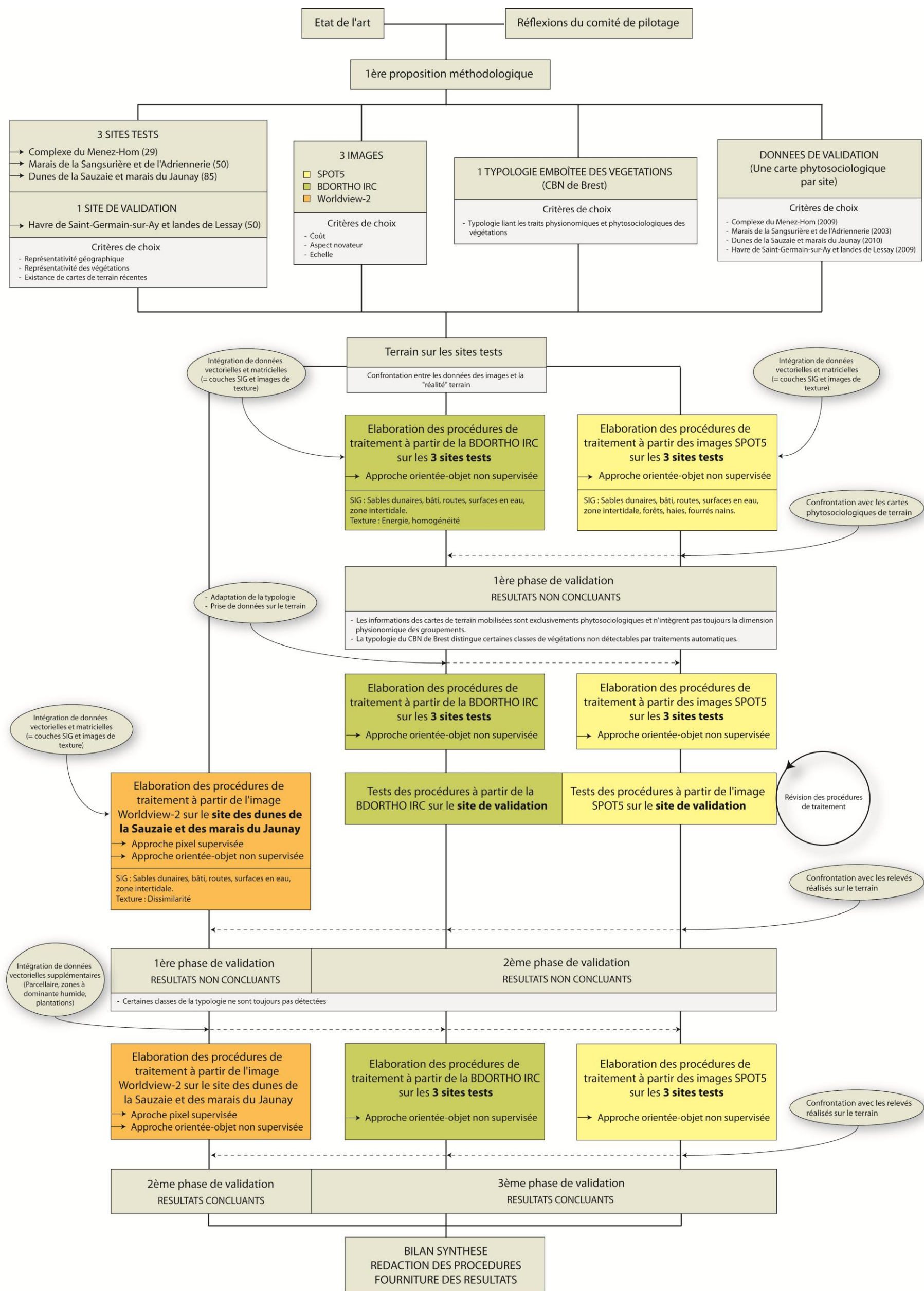


Figure 5 : Diagramme méthodologique du projet

Il est apparu en croisant ces différents paramètres, que les sites les plus adaptés pour les tests étaient (Figure 7 et Tableau 7):

- La réserve naturelle nationale des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie (Manche),
- le site Natura 2000 du complexe du Menez-Hom (Finistère),
- le site Natura 2000 des dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay (Vendée).

Pour la validation, le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay (Manche), de par sa taille de 4 000 hectares et sa remarquable diversité en végétations, a été considéré comme un excellent site de validation.

	Sites tests			Site de validation
Site	Complexe du Menez-Hom	Marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie	Dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay	Havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay
Région/ Département	Bretagne (Finistère)	Basse-Normandie (Manche)	Pays de la Loire (Vendée)	Basse-Normandie (Manche)
Communes	Argol, Trégarvan, Dinéault, Saint-Nic	Doville	Saint Gilles Croix de Vie, Brétignolles sur mer	La feuille, Gonfreville, Lessay, Millières, Muneville-le-Bingard, Pirou, Saint Germain-sur-Ay, Saint Patrice-de-Clays, Vesly
Zonages environnementaux	Parc Naturel Régional d'Armorique Site Natura 2000 (FR5300014)	Parc Naturel Régional des marais du Cotentin et du Bessin Réserve naturelle nationale (FR3600102)	Conservatoire du littoral (FR1100117) Site Natura 2000 (FR5200655)	Parc Naturel Régional des marais du Cotentin et du Bessin Site Natura2000 (FR2500081)
Surface	1 830 ha	396 ha	976 ha	4 056 ha
Etudes existantes	Inventaire et cartographie des habitats terrestres et des espèces végétales d'intérêt communautaire du site Natura 2000 "Complexe du Menez Hom-Argol"(FR5300014)(Durfort 2009)	Cartographie d'habitats : Actualisation de la cartographie des habitats - Réserve Naturelle du marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie (Fillol et al. 2003)	Inventaire et cartographie de la végétation des dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay (FR5200655) (Glemarec et Le Bellour 2010)	Inventaire et cartographie du site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et Landes de Lessay » (FR 2500081)(Le Rest et al. 2009)

Tableau 7 : Description des sites d'étude

3.1- Le site Natura 2000 du complexe du Menez-Hom

Le site du Menez-Hom possède un sous-sol constitué essentiellement de grès armoricain (O2) et de schiste du Postolonnec (O2-5). Les principales végétations qui s'y développent sont :

- Des landes sèches à *Erica cinerea*, et mésophiles à *Erica ciliaris* qui se situent principalement sur les buttes du site. Des landes humides à *Erica tetralix* qui se développent près des tourbières, sur pente assez faible et horizon tourbeux à para-tourbeux.

- Des tourbières hautes à *Narthecium ossifragum*, *Eriophorum angustifolium* et *Sphagnum sp.*, sur des zones alimentées en sources permanentes. Le sol y est constitué de tourbe brune sur plusieurs dizaines de centimètres et la topographie présente des pentes sensibles.
- Des forêts sur le pourtour du site. La lande est gagnée progressivement par des forêts naturelles de conifères, liées à l'essaimage d'anciennes plantations. Au niveau des zones plus humides (résurgence de sources), se sont des boulaies, des aulnaies et des saulaies tourbeuses à marécageuses qui dominent. Enfin, lorsqu'on s'éloigne de ces zones humides, on trouve des boisements de chênes et/ou châtaigniers, des hêtraies acidophiles et des boulaies ou saulaies mésophiles (Durfort 2009).
- Sur le pourtour se développent aussi quelques prairies méso-hygrophiles à hygrophiles à jonc, des prairies mésophiles, des prairies temporaires et des cultures.
- Les habitats des végétations aquatiques sont peu présents et sont constitués essentiellement de quelques ruisseaux venant mourir au pied du Menez-Hom.

3.2- La réserve naturelle régionale des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie

Le sous-sol des marais de la Sangsurière est constitué exclusivement d'alluvions récentes ou actuelles (Holocène), recouvertes par des argiles et des tourbes du quaternaire. On y trouve donc sur ce site une majorité de végétations hygrophiles :

- Des prairies acides hygrophiles caractérisées par les espèces suivantes : *Holcus lanatus*, *Comarum palustre*, *Molinia coerulea*, *Juncus effusus* et *Juncus acutiflorus*.
- Sur certaines zones, on retrouve ces prairies en mosaïque avec des tourbières caractérisées par des bombements à sphaignes et *Erica tetralix*, *Drosera sp.* et *Narthecium ossifragum*.
- Les parcelles au centre du site sont dominées par des fourrés à *Myrica gale* et des cariçaies à *Cladium mariscus* et *Schoenus nigricans*.
- Sur le pourtour du site s'étendent des formations arbustives à saules et bouleaux ainsi qu'un réseau dense de fossés, peuplé de végétations aquatiques flottantes et enracinées en mosaïque avec des prairies amphibies à *Nasturtium sp.*
- A l'extérieur de la réserve, on trouve majoritairement des cultures, des prairies temporaires et des prairies permanentes mésophiles. Sur le mont de Doville subsistent des landes largement dominées par les ajoncs et la fougère aigle (Fillol *et al.* 2003)

3.3- Le site Natura 2000 des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay

Le site Natura 2000 est constitué de deux grands ensembles : des dunes composées de sables dunaires récents et actuels et de marais arrière-littoraux constitués d'alluvions marines datant du Flandrien. On y rencontre donc des végétations très variées :

- Le milieu dunaire est composé majoritairement de dunes fixées dont les espèces caractéristiques sont *Helichrysum stoechas*, *Ephedra distachya*, *Tortula ruraliformis* et *Rosa pimpinellifolia*. En avant de la dune grise, le cordon de dune mobile forme par endroit des mosaïques au niveau de la zone de transition. La dune mobile est caractérisée par l'Oyat. La dune est ponctuée de dépressions humides arrières-dunaires à *Scirpus holoschoenus*, *Juncus maritimus* et *Salix atrocinerea* ou à *Salix arenaria*, *Scirpus holoschoenus* et *Ligustrum vulgare*. Enfin, en arrière de la dune, on trouve un boisement particulier à *Quercus ilex* et

Pinus pinaster. Dans la partie sud du site, on observe un découpage en damier correspondant à d'anciennes cultures de vignes, de zones de maraîchage et de pâturages.

- Les marais arrière-littoraux au contact de la dune sont composés majoritairement de prairies subhalophiles mésohygrophiles qui se développent sur d'anciens terrains salés. Elles sont caractérisées par des espèces telles que *Carex divisa*, *Oenanthe silaifolia*, *Alopecurus bulbosus* et *Hordeum secalinum*. En s'éloignant, se sont les prairies humides mésotrophes et eutrophes qui dominent. Elles sont entourées d'un réseau dense de fossés à végétations flottantes et enracinées en mosaïque avec des prairies amphibies à *Nasturtium sp.* Près de ces fossés, on rencontre quelques roselières, mégaphorbiaies et boisements humides à *Salix atrocinerea* et *Alnus glutinosa* (Glemarec et Le Bellour 2010).
- En dehors du site Natura 2000, les cultures et prairies temporaires sont très présentes. On rencontre cependant quelques prairies et boisements caducifoliés mésophiles.

3.4- Le site Natura 2000 du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay

Ce site, extrêmement riche et diversifié, est constitué de plusieurs grands ensembles : dunes, prés salés, landes et tourbières, prairies hygrophiles, prairies mésophiles, roselières, mégaphorbiaies, bois de feuillus et de conifères, végétations aquatiques.

- Les dunes sont composées de dunes mobiles à *Elymus arenarius* et *Eryngium maritimum* et de dunes fixées à la physionomie et à la composition très variable. En arrière de la dune grise, on observe de nombreux fourrés à *Salix repens*, des dépressions humides intradunales à *Salix repens*, *Schoenus nigricans*, *Juncus bufonius* et *Hydrocotyle vulgaris*, ainsi que des fourrés dunaires à *Ligustrum vulgare*, *Crataegus monogyna* et *Prunus spinosa*.
- Les prés salés sont caractérisés par une succession de végétations du bas schorre au haut schorre. Le bas schorre est dominé par *Puccinellia maritima*. Le moyen schorre est dominé par *Halimione portulacoides*, qui est progressivement supplanté par les espèces du haut schorre : soit le haut schorre à *Limonium vulgare* qui est accompagné de *Sueda maritima* et *Aster tripolium*, soit le haut schorre à *Artemisia maritima* et *Festuca rubra*. Dans les parties les plus hautes du pré salé, on trouve quelques roselières bien développées au contact du haut schorre, composées de Phragmite et de Scirpe et de végétations hygrophiles.
- Les landes sont largement réparties sur le site : des landes humides à *Erica tetralix*, *Ulex minor*, *Molinia coerulea* et *Calluna vulgaris*, et des landes sèches dominées par *Erica cinerea*, *Ulex minor*, *Molinia coerulea* et *Calluna vulgaris*. La plupart de ces landes sont peu visibles sur les photographies aériennes car elles sont dominées par les conifères. Des tourbières sont visibles en quelques zones du site, au contact des landes humides.
- Dans les zones soumises à des inondations hivernales et en bordure de mares, les prairies hygrophiles aux faciès très variables sont soit fauchées soit pâturées. A leur contact on trouve des mégaphorbiaies, roselières et cariçaies, dont la surface a diminué au fil des années.
- Dans les secteurs marécageux et alluviaux et dans les zones de suintement on rencontre des saulaies et aulnaies marécageuses. En zone plus sèche, se sont les boisements de chênes, de frênes, de châtaigniers et de noisetiers qui dominent (Le Rest *et al.* 2009).
- Dans certains fossés et plans d'eau, les végétations aquatiques sont bien présentes.
- En dehors du site Natura 2000, les cultures et prairies temporaires sont bien présentes. On

rencontre encore cependant de nombreuses prairies et boisements caducifoliés.

4- Les données

4.1- Les données images

Trois types d'images ont été testés : des images satellitaires SPOT5 et Worldview-2 et des images aériennes (BDORTHO® IRC) (Tableau 8). Ce choix a été réalisé en respectant différents critères.

	SPOT5	Worldview-2	BDORTHO® IRC
Résolution spatiale (multispectrale)	10m	2m	0,50m
Résolution spatiale (panchromatique)	5m	0,5m	/
Bandes spectrales	V (0,50 - 0,59 µm) R (0,61 - 0,68 µm) PIR (0,78 - 0,89 µm) MIR (1,58 - 1,75 µm)	Coastal (0,40 – 0,45 µm) B (0,45 – 0,51 µm) V (0,51 – 0,58 µm) J (0,58 – 0,62 µm) R (0,63 – 0,69 µm) RedEdge (0,70 – 0,74 µm) PIR1 (0,77 – 0,89 µm) PIR2 (0,86 – 1,04 µm)	V (0,5 – 0,6 µm) R (0,6 – 0,7 µm) PIR (0,7 – 0,9 µm)
Emprise au sol	60x60km	16x14km	Départementale Livrée sous la forme de dalles de 1km x 1km
Echelle de cartographie préconisée	1/25 000	1/5 000	1/5 000
Tarifs (public)	2700€ la scène (MS + Pan) en archive. 3500€ la scène (MS + Pan) en programmation.	26\$/km ² (Standard Bundle 50cm Pan + 8-band 2m MS) (archive). 32\$/km ² (Standard Bundle 50cm Pan + 8-band 2m MS) (programmation)	Environ 1800€ par département
Tarif (contexte de l'étude)	260€ (archive : MS + Pan) à 380€ (programmation : MS + Pan) par l'intermédiaire du programme ISIS	26\$/km ² (Standard Bundle 50cm Pan + 8-band 2m MS) (archive). 32\$/km ² (Standard Bundle 50cm Pan + 8-band 2m MS) (programmation)	480€ pour 3 départements (tarif licence recherche/enseignement)

Tableau 8 : Caractéristiques techniques des images satellitaires et aériennes

Du fait de l'échelle de restitution attendue (1/25 000), nous avons opté pour des images SPOT5 (Figure 8). Elles possèdent une résolution spatiale adaptée, et leur coût est moins élevé que d'autres images de même catégorie. Par ailleurs, cette étude entrant dans le cadre d'un programme de recherche, elles ont pu être acquises par l'intermédiaire du programme ISIS du CNES (<http://www.isis-cnes.fr/>) avec un tarif préférentiel. Les images SPOT possèdent l'avantage de couvrir de larges zones (60x60km) ce qui permet la cartographie de grandes surfaces. Des études récentes ont utilisé ce type d'images pour cartographier l'occupation du sol en pays de Brest (Sparfel 2011) et les milieux naturels du périmètre Vuache-Sion-Laire (Allenbach 2010) avec de bons résultats. De nombreuses études les utilisent en complément d'autres images (Lucas *et al.* 2011 ; Brunet et Renaud 2010). Il a donc été supposé que les images SPOT5 devraient permettre

d'identifier correctement les premiers niveaux de la typologie emboîtée des végétations.

Pour une cartographie plus fine, nous avons opté pour la BDORTHO® IRC de l'IGN (Figure 8). L'Institut Forestier National (IFN) les utilise actuellement pour cartographier les forêts françaises à des niveaux typologiques très fins (nomenclature à 4 niveaux, le niveau 4 correspondant aux peuplements d'essences). L'étude transfrontalière ARCH entre le Kent et le Nord-Pas-de-Calais les utilise avec succès pour la cartographie des habitats naturels (SIRS 2010). L'avantage des ortho-images IRC est leur coût peu élevé (environ 1800€/département) et une excellente résolution spatiale (50 cm actuellement). Leurs inconvénients sont la faible répétitivité des acquisitions (une campagne en moyenne tous les 5 ans, 3 ans à partir de 2014), une fréquente hétérogénéité radiométrique des images au sein d'un même département, un nombre faible de bandes spectrales et enfin l'absence d'information précise sur la date d'acquisition des images.



Figure 8 : Extrait des images sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay (de gauche à droite : Worldview-2, BDORTHO® IRC, SPOT5)

En complément à ces deux premières images, et à titre exploratoire, une image Worldview-2 (Figure 8) caractérisée par une résolution spatiale et spectrale élevée a été choisie. C'est une image qui est encore peu utilisée en cartographie de la végétation, contrairement aux images IKONOS et Quickbird (Mehner *et al.* 2004 ; Förster et Kleinschmit 2008 ; Giannetti *et al.* 2010). Son coût (Tableau 8) et des délais d'acquisition assez longs sont en partie responsables.

La BDORTHO® IRC (Annexe 2) et les images SPOT5 (Annexe 3) ont été acquises sur les 4 sites d'études, ce qui nous permettra d'évaluer la reproductibilité des traitements pour ces images. En revanche l'image Worldview-2 (Annexe 4) n'a été acquise que sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay.

Les images satellitaires ont été acquises en modes multispectral et panchromatique. L'image SPOT5 sur le Menez-Hom et l'image Worldview-2 ont été obtenues via les archives de SPOTImage et European Space Imaging ; la couverture nuageuse étant nulle et les dates

d'acquisition convenables pour l'étude de la végétation. Les autres images ont été acquises en programmation (Tableau 9).

	Menez-Hom (SPOT5)	Sangsurière (SPOT5)	Sauzaie-Jaunay (SPOT5)	Sauzaie-Jaunay (Worldview-2)
Date de la prise de vue	25/04/2011	31/07/2011	25/06/2011	25/05/2011
Heure de la prise de vue	11:02	11:35	11:29	11:33

Tableau 9 : Caractéristiques des images satellitaires utilisées

4.2- Les données auxiliaires

4.2.1- Les données vectorielles

Dans la majorité des études identifiant les végétations par traitement d'images, des données auxiliaires sont utilisées car elles permettent de discriminer celles dont les signatures spectrales sont proches (Allenbach *et al.* 2010). Les images aériennes et images satellitaires sont acquises à des résolutions de plus en plus fines ce qui permet théoriquement de réaliser des cartographies à des échelles de plus en plus grandes. Néanmoins à ces résolutions, le nombre d'objets à identifier et leur hétérogénéité s'accroît ce qui complique les procédures d'extraction des objets (Sparfel *et al.* 2008 ; Baatz *et al.* 2008). Le recours à des informations auxiliaires provenant de différentes sources s'impose pour favoriser l'extraction des objets (Bock *et al.* 2005 ; Triepke *et al.* 2008 ; Eisfelder *et al.* 2009 ; Allenbach *et al.* 2010 ; Renaud *et al.* 2010 ; Lucas *et al.* 2011). Elles concernent des variables physiques (climat, topographie, géologie, hydrologie...), naturelles (végétation...), anthropiques (occupation et utilisation du sol...). Notons que les couches thématiques structurées dans un SIG fournissent la plupart des informations à l'appui des classifications d'images. Néanmoins, réaliser une classification en utilisant des données auxiliaires implique leur disponibilité (Förster et Kleinschmit 2008) et leur qualité. Suivant l'objet de la cartographie, il peut être nécessaire de disposer de données mises à jour régulièrement et l'utilisation de ce type de données peut alors devenir une contrainte à la cartographie.

L'utilisation de ces informations est variable selon les auteurs. Certains les intègrent directement comme outils de classification (Hubert-Moy *et al.* 2006), alors que d'autres tels que Sparfel (2011) et Alexandridis (*et al.* 2009) incluent une à plusieurs couches thématiques relatives à l'hydrologie comme aide à la discrimination des zones humides pour la première, des prairies humides pour la seconde et pour réduire les efforts de photo-interprétation pour le dernier. Elles peuvent aussi servir de masque intégré à la classification (Moré *et al.* 2005 ; AESN 2006 ; Frohn *et al.* 2009 ; Brunet et Renaud 2010). Elles sont souvent dérivées de données SIG : la pente et l'exposition issues du MNT, les moyennes de précipitations, de radiation et de températures issues de données climatiques (Förster et Kleinschmit 2008 ; Roche *et al.* 2010 ; Renaud *et al.* 2010).

Nous avons utilisé pour ce projet des données auxiliaires qui ont été intégrées à la classification et qui nous ont permis de discriminer un plus grand nombre de milieux (Tableau 10 et 11). Ce sont soit des données brutes issues directement des bases de données de l'IGN, du BRGM ou de l'IFN, soit des données élaborées à partir d'autres couches d'information. Nous nous sommes

attachés à n'utiliser que des données pouvant être acquises sur la totalité du territoire français, dans l'optique d'une application de la méthodologie sur un plus vaste territoire.

Donnée	Producteur de la donnée	Echelle d'exploitation	Commentaires	BDORTH O® IRC	SPOT5	Worldvie w-2
Sables dunaires	BRGM - Bd Scan-Géol-50	1/50 000	Compte tenu de l'échelle d'utilisation de cette donnée, quelques modifications aux limites ont été apportées.	X	X	X
Zones à dominante humide (ZDH)	CBN de Brest	1/50 000	Cette donnée a été produite selon le protocole décrit dans le rapport de I-MAGE Consult (I-MAGE CONSULT 2006) quand elle n'était pas déjà disponible par ailleurs.	X	X	X
Parcellaire	IGN - BDPARCELLAIRE®	1/25 000	Cette donnée provient de la couche en format vecteur « PARCELLE », ou de la numérisation de la BDPARCELLAIRE® en format raster pour les sites ou le format vecteur n'est pas encore disponible.	X	X	X
Bâti	IGN - BDTOPO®	1/25 000	Cette donnée provient de la fusion de la couche « BATI_INDIFFERENCIE », « BATI_INDUSTRIEL », « BATI_REMARQUABLE », « CIMETIERE », « CONSTRUCTION_SURFACIQUE », « PISTE_AERODROME », « RESERVOIR » et « TERRAIN_SPORT ».	X	X	X
Routes	IGN - BDTOPO®	1/25 000	Cette donnée provient de la fusion de la couche « CHEMINS » (buffer de 3 mètres de large), « ROUTES_PRIMAIRES » (buffer de 10 mètres de large) et « ROUTES_SECONDAIRES » (buffer de 5 mètres de large).	X	X	X
Surfaces en eau	IGN - BDTOPO®	1/25 000	Cette donnée provient de la fusion de la couche « TRONCON_COURS_EAU » (buffer de 8 mètres de large) et « SURFACE_EAU ».	X	X	X
Zone intertidale	IGN - BDTOPO®	1/25 000	Cette donnée provient de la numérisation de la zone située entre les laisses des plus hautes eaux et celles des plus basses eaux, elles même issues de la couche « TRONCON_LAISSE ».	x	x	x
Forêts	IFN/IGN - BDTOPO®	1/25 000	Cette donnée provient de la couche « ZONE_VEGETATION ».		X	
Haies	IFN/IGN - BDTOPO®	1/25 000	Cette donnée provient de la couche « ZONE_VEGETATION ».		X	
Fourrés nains	IFN/IGN - BDTOPO®	1/25 000	Cette donnée provient de la couche « ZONE_VEGETATION ».		X	
Plantations	IFN/IGN - BDTOPO®	1/25 000	Cette donnée provient de la couche « ZONE_VEGETATION ».	X	x	X

Tableau 10 : Données auxiliaires vectorielles utilisées pour les classifications de chaque type d'image

La couche SIG « ZONE_VEGETATION » de la BDTOPO® utilisée pour extraire les forêts, les

haies, les fourrés nains et les plantations, est issue du « fond vert » de la BD Forêts de l'IFN. Cette base de données est disponible sur toute la France dans sa version 1. Une deuxième version beaucoup plus précise en termes d'échelle et de nomenclature est en cours d'élaboration. Cette version 2 distingue par exemple (contrairement à la version 1) les forêts des fourrés des plantations. Elle est actuellement disponible sur les départements du Finistère et de la Vendée mais pas de la Manche. C'est la raison pour laquelle, sur les sites de la Sangsurière et de l'Adriennerie et du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay, nous avons été contraints d'identifier et d'extraire au sein de la couche « forêt » de la BDTOPO®, les fourrés nains et les plantations. Les objets restant de la couche « forêts » comprennent donc en réalité les forêts et les haies.

4.2.2- Les données matricielles

En complément de l'information spectrale, la texture apporte des informations qui peuvent améliorer la qualité des classifications des images de télédétection (Bock *et al.* 2005 ; Mallinis *et al.* 2008 ; Ota *et al.* 2010). Les calculs de texture prenant un temps considérable sous eCognition, logiciel que nous utilisons pour les traitements, nous avons utilisé le logiciel ENVI pour dériver des images de texture à partir de nos images aériennes et satellitaires (Tableau 11). Elles sont ensuite intégrées sous eCognition comme image supplémentaire.

Images de texture	Producteur de la donnée	Echelle d'exploitation	Commentaires	BDORTH O® IRC	SPOT5	Worldview-2
Energie (Second moment)	CBN de Brest	1/5 000	Cette donnée de texture est dérivée de la BDORTH O IRC® sous ENVI sur la bande du PIR (Annexe 5)	X		
Homogénéité (Homogeneity)	CBN de Brest	1/5 000	Cette donnée de texture est dérivée de la BDORTH O IRC® sous ENVI sur la bande du PIR (Annexe 5)	X		
Dissimilarité (Dissimilarity)	CBN de Brest	1/5 000	Cette donnée de texture est dérivée de l'image Worldview-2 sous ENVI sur la bande du PIR et du panchromatique (Annexe 5)			x

Tableau 11 : Données auxiliaires matricielles utilisées pour les classifications de chaque type d'image

5- Traitements

Avant de rentrer dans le détail des traitements, il convient de revenir sur la typologie et de faire un point sur les logiciels et les types de classification qui ont été utilisés (l'utilisation de ces classifications sera justifiée au cas par cas dans la description des procédures de traitement).

5.1- La typologie « de travail »

Suite aux premiers traitements réalisés à partir de la BDORTH O® IRC et des images SPOT5, il s'est avéré que plusieurs classes de la typologie du CBN de Brest nous ont posé des problèmes d'identification. Ces problèmes sont liés à la hiérarchisation des végétations (elle-même liée aux définitions des végétations) qui n'est pas toujours adaptée à une identification par traitements automatiques. Deux solutions sont alors possibles :

- Soit nous avons conservé les classes de la typologie, mais nous en avons proposé une hiérarchisation différente dans les perspectives futures (Partie 4.2),
- soit nous avons créé de nouvelles classes typologiques. Cela concerne : les végétations aquatiques, les prairies et pelouses amphibies et les fourrés crassulescents (pour les images SPOT).

Les végétations aquatiques et les prairies et pelouses amphibies sont difficiles à extraire pour plusieurs raisons : elles sont souvent en mosaïque, leur localisation est très variable d'une année sur l'autre et elles se situent très souvent dans des fossés que l'on peut difficilement mettre en évidence à cause de la végétation rivulaire présente (Figure 9). A ce stade du travail, aucune modification de la typologie du CBN de Brest n'étant possible, nous avons choisi de créer une nouvelle classe typologique « Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies ». Cette classe regroupe les surfaces en eau, les végétations aquatiques et les prairies et pelouses amphibies. Cette classe pourrait donc être décrite comme « un lieu d'accueil potentiel des végétations aquatiques et les prairies et pelouses amphibies ».



Figure 9 : Exemple de fossé sur le site des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie. Les types de végétations sont très imbriqués. Certaines végétations (forestières) en masquent d'autres (herbacées et aquatiques).

Dans le cas des images SPOT, nous n'avons pas identifié de paramètre satisfaisant pour extraire les fourrés crassulescents. Ces végétations se retrouvent donc en mélange avec les végétations des prés salés. En revanche, ces deux types de végétations sont identifiables à partir de la BDORTHO® IRC. Nous avons donc deux définitions des prés salés, en fonction de l'image avec laquelle on travaille (Tableau 12).

Le tableau suivant (Tableau 12) résume la totalité des classes qui ont été identifiées à partir des trois types d'images, par les méthodes de traitements automatiques.

- Les classes en gris sont celles qui ont dû être ajoutées pour les besoins de la classification et qui n'étaient pas présentes dans la typologie fournie au départ.

- Les autres classes correspondent aux classes de la typologie emboîtée des végétations du CBN de Brest qui ont pu être extraites en traitement automatique. Les couleurs correspondent aux différents niveaux de cette typologie (Annexe 1).

Chaque classe de la typologie fournie au départ a été définie dans le document de Delassus et Magnanon (2012) (Annexe 1). Pour les classes nouvellement créés, et dont les définitions ont été modifiées, les nouvelles définitions sont disponibles dans le tableau 12.

Suivant les images, nous avons identifié tout ou partie des classes. Le niveau le plus fin de la typologie du CBN de Brest ayant pu être identifié par traitement automatique d'image est le niveau « Division » (pour certains types de végétations herbacées uniquement). Les catalogues des traitements par type de végétation en annexes, permettent de savoir quelles classes ont été identifiées en fonction du type d'image (Annexes 6, 7 et 8).

Dans les pages suivantes, lorsque nous parlerons de typologie il s'agira donc de celle qui est présentée dans le tableau 12. Nous la qualifierons de « typologie de travail ».

5.2- Logiciels

Pour l'analyse des données SIG nous avons utilisé ArcGis (ESRI) mais nous aurions pu utiliser des logiciels libres comme Qgis. Pour les prétraitements et la classification selon la méthode pixel nous avons utilisé ENVI (ITT) et enfin pour développer les traitements en approche orientée-objet nous avons utilisé eCognition developer (Trimble). Cependant nous avons été confrontés aux limites de la licence developer d'eCognition pour les traitements à partir de la BDORTHO® IRC sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et les landes de Lessay. Nous conseillerions donc dans le cadre de cartographies sur de très grands territoires d'acquérir une licence server qui permet de découper le territoire en plus petits ensembles, et la bonne concordance entre les classes aux limites de ce découpage.

5.3- Les types de classification

5.3.1- L'approche orientée-objet

L'approche orientée-objet se déroule en deux étapes :

- 1- Segmenter l'image en objets en fusionnant des pixels adjacents ;
- 2- Classer ces objets suivant des critères de forme, de texture, de couleur et de contexte.

5.3.1.1- Segmentation

Le logiciel eCognition propose un certain nombre d'outils de segmentation. Nous en avons retenu quatre qui appartiennent à deux types de segmentations (Top-Down et Bottom-Up)¹⁴.

La segmentation Top-Down découpe l'image en objets de plus en plus petits :

¹⁴ Les définitions proviennent du Reference Book fournit avec le logiciel.

Niveau 1	Définition	Niveau 2	Définition	Niveau 3	Définition
Milieux non végétalisés	Milieux où on observe une absence de végétation. Cela correspond aux terres non cultivées, aux zones sableuses, aux zones rocheuses, aux estuaires, à la mer et aux zones de bâti (habitations, parkings, routes...).				
Végétations artificielles	Les végétations artificielles selon Westhoff 1971 (Géhu 2006), sont des végétations dont la structure a été entièrement détruite par l'homme et dont la composition floristique est en grande majorité allochtone.	Cultures	Comprend les parcelles cultivées (céréales, maraichage) et certaines prairies temporaires.		
		Plantations	Regroupe l'ensemble des végétations artificielles arborées (plantations de conifères, peupleraies...). On y inclut les vergers.		
		Parc et jardins	Regroupe tous les parcs et jardins à proximité du bâti.		
Végétations naturelles et semi-naturelles	Les végétations naturelles selon Westhoff 1971 (Géhu 2006), sont des végétations dont la structure initiale n'a pas été modifiée par l'homme et dont la composition floristique est autochtone. Les végétations semi-naturelles selon Westhoff 1971 (Géhu 2006), sont des végétations dont la structure initiale a été modifiée par l'homme mais dont la composition floristique reste fondamentalement autochtone.	Forêts	Selon Géhu (2006), les forêts sont des formations arborescentes de plus de 7 mètres dont les arbres possèdent une densité suffisante pour que toute la végétation des strates sous-jacentes (arbustive, herbacée et muscinale) soit conditionnée par leur présence. Les couronnes doivent être contiguës, ou ne laisser que des vides réduits, ou des ouvertures temporaires causées par la mort d'un arbre.	Forêts mésophiles (caducifoliées)	Végétations forestières caducifoliées des sols bien drainés (sols non hydromorphes en surface) à strate arborée variée ou des sols frais à légèrement humides. Les espèces hygrophiles, quand elles sont présentes, ne dominent pas la strate herbacée.
				Forêts hygrophiles (caducifoliées)	Ce terme regroupe les végétations forestières des sols humides à engorgés (gley, pseudogley ou histosols) marquées par une strate arborée dominée par les Aulnes (<i>Alnus sp.</i>) ou les Saules arborescents (<i>Salix alba</i> , <i>S. purpurea</i> , <i>S. triandra</i>). La strate herbacée est marquée par l'abondance d'espèces hygrophiles.
				Forêts de conifères	Végétations sempervirentes de structure forestière dont la strate arborée est composée, en majorité (plus de 75%), d'essences dont les appareils chlorophylliens sont réduits à des écailles ou à des feuilles minces et allongées en forme d'aiguille.
				Forêts de sclérophylles	Végétations forestières sempervirentes plus ou moins hautes dont la strate arborée est composée, en majorité, d'essences dont les appareils chlorophylliens sont des feuilles coriaces et persistantes, et possédant un épiderme épaissi recouvert d'un enduit cireux. Ces forêts sont caractéristiques des climats secs à semi désertiques. Sur le territoire d'agréments, cette formation n'est représentée que par la chênaie-pinède dunaire sud atlantique.
				Forêts mixtes	Végétations de structure forestière dont la strate arborée est co-dominée par les essences feuillues et les essences à aiguilles.
		Fourrés arbustifs	Selon Géhu (2006), les fourrés sont des formations arbustives de plus de 0,5 mètres, plus ou moins denses et difficiles à pénétrer selon leur hauteur. La strate supérieure est dominée par des arbrisseaux (nanophanérophytes).	Fourrés mésophiles et mésohygrophiles	Végétations arbustives des sols bien drainés (sols non hydromorphes en surface) à strate arbustive variée (parfois « dirigée », c'est à dire favorisée par une gestion spécifique). La strate herbacée est marquée par la rareté ou l'absence d'espèces hygrophiles.
				Fourrés hygrophiles	Végétations arbustives des sols humides à engorgés (gley, pseudogley ou histosols) marquées par une strate supérieure dominée par les espèces du genre <i>Salix</i> (à l'exception de <i>Salix capraea</i>). La strate herbacée est marquée par l'abondance d'espèces hygrophiles.
		Fourrés nains	Les fourrés nains sont des formations arbustives rarement hautes de plus de 0,5 mètres, plus ou moins denses. La strate supérieure est dominée par des sous-arbrisseaux (chaméphytes frutescents).	Landes et garrigues	Ensembles structurels de taille basse (de quelques centimètres) à moyenne (environ 1,50 m) toujours dominés et donc structurés par des chaméphytes frutescents généralement sempervirents se développant de manière contiguë (les individus se touchent).
				Tourbières à chaméphytes	Végétations basses caractérisées par une strate marquée par les chaméphytes frutescents se développant sur une strate muscinale dense dominée par les espèces du genre <i>Sphagnum</i> . Les espèces herbacées peuvent occuper une place plus ou moins importante et co-dominer dans les groupements.
				Fourrés crassulescents	Ce terme regroupe les végétations de structure arbustive ou chaméphytique dominées par des ligneux (arbrisseaux ou sous-arbrisseaux) dont les appareils chlorophylliens (feuilles et parfois tiges) sont crassulescents, c'est-à-dire composés de tissus charnus capables de stocker l'eau.
		Végétations aquatiques marine		Herbiers marins	Ce terme comprend les herbiers marins algaux accrochés à un substrat rocheux en milieu intertidal
		Végétations herbacées		Prairies mésophiles	Ce terme regroupe les végétations herbacées plus ou moins à fermées, généralement dominées par les graminées et riches en hémicryptophytes. Les graminées de la strate dominante présentent la

					particularité d’être peut concurrentes (renouvellement rapide des feuilles, faible occupation de l’espace par individu, peu de production de litière). Ces formations caractérisent les milieux fertiles à très fertiles (méso-eutrophes à eutrophes). On inclut certaines prairies temporaires dans cette définition.
				Prairies hygrophiles	Ce terme regroupe les végétations herbacées, dominées par les graminées, des systèmes plus ou moins longuement inondables, avec ou sans accumulations de tourbe. Le sol présente une hygromorphie dès les horizons supérieurs. Elles sont caractérisées par la dominance des espèces hygrophiles.
				Pelouses sur sable non fixé	Groupements herbacés plus ou moins hauts et fermés des dunes mobiles directement influencées par la proximité de la mer. Ils sont marqués par la dominance de graminées dont les appareils feuillés et racinaires sont adaptés aux conditions difficiles du milieu. Il s’agit notamment de l’Oyat (<i>Ammophila arenaria</i>) et de l’Elyme des sables (<i>Leymus arenarius</i>).
				Pelouses sur sable fixé	Groupements herbacés plus ou moins ouverts, dominés par les hémicryptophytes et riches en espèces annuelle, souvent également riches en bryophytes et en lichens. Ils occupent les sables plus ou moins stabilisés des arrières dunes et des buttes intérieures ou, rarement, les dépôts arénacés acides peu épais. La végétation est adaptée à une sécheresse édaphique liée au substrat filtrant.
				Roselières et cariçaies	Communautés assez hautes à hautes, généralement fermées, dominées par des héliophytes graminéens (Poacées et Cypérées). Les roselières et cariçaies identifiées à partir de la BDORTHO® IRC sont les roselières et cariçaies littorales alors que celles identifiées à partir de l’image Worldview-2 sont les roselières et cariçaies intérieures.
				Franges et lisières	Formations plus ou moins denses généralement dominées par les non graminéides (plantes à phorbes), parfois par les graminées sociales (ourlets en nappes) des lisières forestières et des stades de reconquête des parcelles abandonnées (ourlets en nappes et friches). Communément, elles se développent de façon linéaire, le long des lisières forestières, des haies, des talus routiers, etc. Elles peuvent également se développer de façon surfacique dans les parcelles abandonnées par l’agriculture, en voie de fermeture. Les espèces présentent un caractère compétiteur marqué, soit par le développement vertical des appareils végétatifs (espèces hautes à larges feuilles), soit par leur développement horizontal (graminées sociales à fort recouvrement foliaire et produisant une quantité importante de matière sèche).
				Prés salés	<u>BD ORTHO® IRC</u> : Ce terme regroupe les végétations herbacées vivaces, dominées par les graminéides halophiles, c’est-à-dire capables de supporter des fortes concentrations en chlorure de sodium (sécheresse physiologique) sur des sols pouvant se gorger d’eau et s’assécher très rapidement. Les communautés s’organisent en fonction de cette concentration en sel. Les Chenopodiaceae occupent généralement une place importante dans ces communautés.
				Prés salés	<u>SPOTS</u> : Ce terme regroupe les végétations herbacées vivaces, dominées par les graminéides halophiles, c’est-à-dire capables de supporter des fortes concentrations en chlorure de sodium (sécheresse physiologique) sur des sols pouvant se gorger d’eau et s’assécher très rapidement. Les communautés s’organisent en fonction de cette concentration en sel. Les Chenopodiaceae occupent généralement une place importante dans ces communautés. Ainsi que les végétations de structure arbustive ou chaméphytique dominées par des ligneux (arbrisseaux ou sous-arbrisseaux) dont les appareils chlorophylliens (feuilles et parfois tiges) sont crassulescents, c’est-à-dire composés de tissus charnus capables de stocker l’eau.
		Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies	Cette classe regroupe les surfaces en eau continentales, les végétations aquatiques continentales au sens de la typologie du CBN de Brest (formations inondées caractérisées par les espèces végétales présentant une profonde adaptation à la vie dans l’eau. Ces espèces sont incapables de se dresser par elles-mêmes en dehors de l’eau) ainsi que les prairies et pelouses amphibies au sens de la typologie du CBN de Brest (Végétations herbacées dont la physionomie est souvent marquée par les graminées et les graminéides occupant les sites longuement inondés en hiver et dont le substrat reste toujours humide, même en été. Les hémicryptophytes rampantes ou à rosette peuvent également être très présentes. Ces communautés occupent les zones les plus basses des marais ou les bords des étangs, fossés, rivières.).		

Tableau 12 : Description des classes de la « typologie de travail » (Noir : Classe de formation ; Rouge : Sous-classe de formation ; Orange : Formation ; Beige : Division ; Jaune : Macro groupe)

- Chessboard segmentation : Cet algorithme permet de diviser l'image en carrés homogènes suivant une grille dont on définit la taille et qui est alignée sur la bordure en haut à gauche de l'image. Nous avons utilisé cet algorithme de deux façons : soit pour intégrer des données SIG, auquel cas nous appliquons une taille d'objet très élevée de façon à ce que seul le contour des données SIG soit pris en compte, soit nous utilisons sa fonction première qui permet de diviser l'image en carrés de taille définie.



Figure 10 : Exemple d'application de la « Chessboard segmentation »

- Contrast split segmentation : Cet algorithme est basé sur un seuil, qui maximise le contraste entre les objets brillants (c'est à dire les objets qui se situent au dessus du seuil) et les objets sombres (qui se situent en dessous du seuil). L'algorithme évalue le seuil optimal pour chaque objet de l'image.

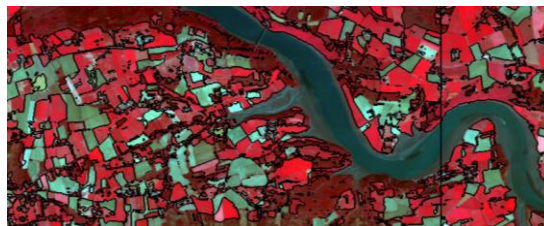


Figure 11 : Exemple d'application de la « Contrast split segmentation »

La segmentation Bottom-up regroupe les pixels en objets de plus en plus grands :

- Multiresolution segmentation : Cet algorithme permet de fusionner des pixels adjacents ayant une homogénéité de forme et de couleur afin de créer des objets dont on peut définir la taille. Plus le paramètre d'échelle est faible, plus les objets sont petits. Cet algorithme permet par ailleurs de transcrire les dépendances hiérarchiques que l'on observe dans le monde réel. Après avoir effectué une première segmentation de l'image, l'utilisateur peut ensuite créer différents niveaux qui s'empilent les uns sur les autres, en morcelant ou fusionnant les objets issus de la segmentation initiale. Les objets créés à chaque niveau sont reliés entre eux par un réseau hiérarchique permettant à l'utilisateur d'exploiter les relations entre les différents niveaux pour optimiser les procédures de classification et les fonctions d'appartenance.

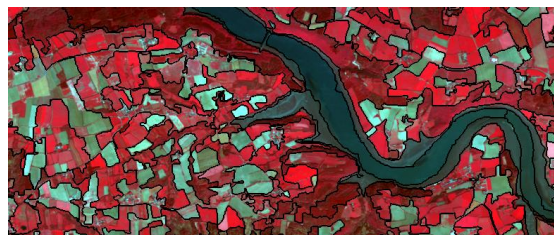


Figure 12 : Exemple d'application de la « Multiresolution segmentation »

- Spectral difference segmentation : Cet algorithme fusionne les objets voisins en fonction des intensités (différence entre l'intensité moyenne et la valeur spectrale maximale). Il s'applique après une première segmentation afin de fusionner les objets adjacents spectralement similaires.

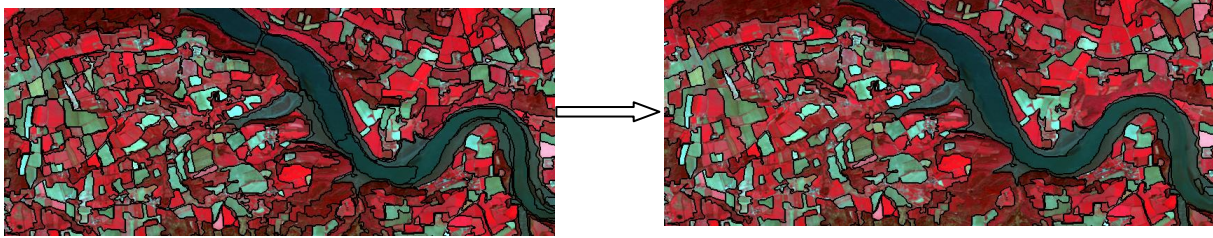


Figure 13 : Exemple d'application de la « Spectral difference segmentation »

5.3.1.2- Classification

Pour la classification, nous avons utilisé une approche non supervisée, qui fait appel à des fonctions d'appartenance (Fuzzy classification). Elle nécessite la construction de règles qui sont générées de manière experte à partir des connaissances de l'utilisateur. Ces règles peuvent utiliser la couleur, la taille, la forme, le contexte des objets, ce qui améliore considérablement les performances de l'interprétation. L'implémentation de ces règles se fait à partir de "fonctions d'appartenance floues" de manière à prendre en compte les incertitudes inhérentes aux images de télédétection.

Nous avons utilisé une approche déductive pour la réalisation de nos traitements qui consiste à effectuer une succession de masques en classant d'abord les objets aisément identifiables comme l'eau, et en créant ensuite une seconde classe « non eau » composée de tous les objets ne correspondant pas aux règles de connaissance de la classe « eau ». Les objets classés ensuite sont alors définis comme des « enfants » de la classe « non eau », et héritent ainsi de ses caractéristiques physiques (Sparfel 2011).

5.3.2- L'approche pixel supervisée

Nous avons utilisé une approche supervisée dite du plus proche voisin, qui se base sur un algorithme de maximum de vraisemblance (Maximum Likelihood). Il nécessite l'acquisition d'échantillons d'apprentissage et attribue ensuite les pixels aux classes avec lesquels ils ont le plus de similitudes.

5.4- BDORTHO® IRC

5.4.1- Prétraitements

Il y a encore quelques années, l'utilisation de la version 1 de la BDORTHO® était discutée pour les études sur la végétation. Le rapport de TBM en 2007 nous en donne plusieurs raisons : une qualité des images très variables d'une zone à une autre ce qui rend discutable la mise en place d'une chaîne de traitement reproductible, une information spectrale insuffisante avec notamment l'absence d'un canal dans le proche infrarouge, et une période de prise de vue imposée. Mais des

progrès ont été réalisés depuis. La nouvelle version de la BDORTHO® (images acquises depuis 2005) utilisée dans le cadre de ce travail bénéficie d'amélioration par rapport aux anciennes versions. Elle est en effet caractérisée par *« une meilleure qualité radiométrique grâce à différents traitements d'égalisation et de rehaussements, une meilleure qualité géométrique grâce à des canevas photogrammétriques de meilleurs qualités et une meilleure qualité des prises de vues avec intégration d'un canal dans le proche infrarouge »* (IGN 2011). Ces améliorations pourraient donc favoriser l'usage de ces images pour l'étude de la végétation par télédétection.

La BDORTHO® IRC est livrée sous la forme de dalle de 1km x 1km, en format tiff et en Lambert 93. Un certain nombre de corrections ont été réalisées par l'IGN avant la diffusion. *Le nombre de clichés nécessaires pour couvrir un département est important, ces clichés présentent des disparités fortes d'ensoleillement, d'apparence colorée, de paysage, de comportement d'objets (carrières, sables, surfaces d'eau, ...) et parfois de saison. Dans l'idéal, l'ortho-image d'un département doit être continue et homogène sans surface saturée conséquente. En pratique, l'aspect radiométrique de la mosaïque est le résultat d'un compromis sur tout le département tenant compte des disparités mentionnées. Pour la couleur, chaque cliché est corrigé des effets internes d'éclairement et de couleurs liés à l'ensoleillement. L'ensemble des clichés est ensuite homogénéisé et la mosaïque est finalement globalement rehaussée en couleur et en dynamique afin d'obtenir un rendu le plus naturel possible. Pour le canal infrarouge, chaque cliché est corrigé des effets internes d'éclairement et de couleur lié à l'ensoleillement, puis la mosaïque est corrigée globalement afin d'exploiter au mieux le spectre radiométrique d'une façon proche des canaux rouge et vert qui composent avec le canal infrarouge les images infrarouge couleur* (IGN 2011).

Notre travail de prétraitement sur les ortho-images se limite donc en la création d'une mosaïque sur chaque site sous ArcGis (Annexe 2).

5.4.2- Données auxiliaires mobilisées

Suivant la qualité spatiale et spectrale de l'image, nous avons utilisé tout ou partie des données auxiliaires à disposition (Tableau 10 et 11).

5.4.3- Présentation du réseau hiérarchique de classification de la BDORTHO® IRC

L'ensemble des traitements retenus est réalisé en approche orientée-objet sous eCognition. Quelques traitements sous ENVI de classification supervisée (SVM, MaxLike) et non supervisée (K-Means) ont été effectués pour tester l'approche pixel sur la BDORTHO® IRC. Mais le nombre limité de bandes spectrales de la BDORTHO® IRC n'a pas permis d'extraire des classes de façon satisfaisante. Les résultats n'étant pas concluants, nous n'avons pas intégré cette approche au processus.

Les procédures de classification et le catalogue complet des traitements est disponible en annexe 6. Il est le résultat de la concaténation des traitements réalisés sur les 3 sites tests. La reproductibilité des procédures de classification a été vérifiée sur le site de validation du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay (Annexe 9). Pour les classes dont la reproductibilité n'était pas avérée, de nouveaux paramètres de classifications ont été recherchés jusqu'à ce qu'on

considère que les résultats de la classification soient satisfaisants. Les surfaces totales (km²) sur lesquelles ont été effectués les traitements par site sont disponibles dans le tableau 13.

	Menez-Hom	Sangsurière	Sauzaie-Jaunay	Lessay
BD ORTHO® IRC	43	12	45	70

Tableau 13 : Superficie en km² des images

Les procédures de classification sont constituées de 4 étapes (Figure 14), qui correspondent aux quatre segmentations qui sont appliquées successivement à la mosaïque d'images (Tableau 14).

	Informations utilisées	Echelle	Couleur	Forme
1 (Chessboard)	Bâti, routes, surfaces en eau, plantations, sable dunaire, zone intertidale, parcellaire	100 000	/	/
2 (Multirésolution)	Homogeneity, second moment, sables dunaire, zones à dominante humide, zone intertidale	150	0,9	0,5
3 (Chessboard)	Parcellaire, zones à dominante humide	100 000	/	/
4 (Multirésolution)	Zones à dominante humide, parcellaire, zone intertidale	10	0,9	0,5

Tableau 14 : Paramètres de segmentation pour la BDORTHO® IRC (eCognition)

L'étape 1 a pour objectif d'intégrer des données vectorielles qui vont nous aider à extraire un maximum d'objets qui ne sont pas d'intérêt pour la suite (cela concerne essentiellement les milieux non végétalisés et les végétations artificielles), et à classer des grands types de milieux qui seront déclinés par la suite (Milieu dunaire, milieu intertidal). Tout au long du processus nous avons ensuite travaillé par masques successifs en commençant par isoler les classes les plus faciles à identifier jusqu'aux classes les plus complexes. A l'étape 2 le paramètre d'échelle (150) vise à segmenter l'image en grands types de végétations : fourrés arbustifs caducifoliés, fourrés nains, forêts, pelouses mésophiles à xérophiles et végétations intertidales. A l'étape 4, le paramètre d'échelle (10) a pour objectif de segmenter l'image en très petits objets afin d'affiner la classification.

Dans le diagramme méthodologique qui est présenté en figure 14, certains intitulés ne sont pas présents dans la typologie de travail. Ce sont des classes qui sont utilisées de façon temporaire pendant le processus de classification des végétations et dont les objets sont réaffectés au cours du processus. C'est le cas par exemple des « végétations intertidales » et des « pelouses mésophiles à xérophiles ».

En ce qui concerne le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay, nous n'avons pu appliquer les traitements sur l'ensemble de la mosaïque, le logiciel n'étant pas assez puissant pour traiter l'entièreté de l'image. Au lieu des 107 km² initiaux nous avons donc traité 70 km².

5.5- SPOT5

5.5.1- Prétraitements

Nous avons acquis des images avec un niveau de prétraitement 2A, ce qui inclut une rectification de la scène dans la projection standard mondiale (UTM WGS 84). SPOT-Image garantit une précision de localisation de la scène de 30m. Un certain nombre de traitements supplémentaires ont été appliqués à la scène afin d'en améliorer la qualité radiométrique et géométrique. Ces traitements ont été réalisés sous ENVI.

5.5.1.1- Fusion de l'image SPOT5

Nous avons fusionné avec l'algorithme de Gram-Schmidt (ré-échantillonnage avec la méthode de convolution cubique), l'image multispectrale à l'image panchromatique afin d'en améliorer la qualité spatiale. Le résultat est une image multispectrale à 5 m de résolution après la fusion (Figure 15). La fusion présente l'avantage d'avoir une meilleure résolution mais l'inconvénient de dégrader la profondeur spectrale ce qui peut affecter la séparabilité de certaines formations végétales.

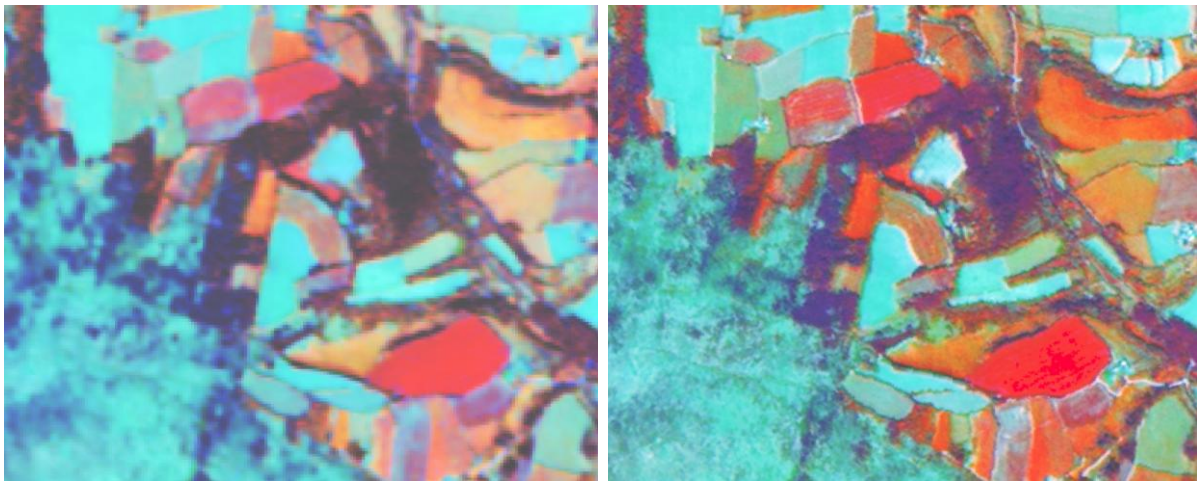


Figure 15 : Extrait d'une image non fusionnée (gauche) et fusionnée (droite)

5.5.1.2- Corrections atmosphériques

Nous avons ensuite appliqué des corrections atmosphériques à cette image fusionnée, qui permettent d'assurer la reproductibilité de la méthode de classification et d'effectuer des comparaisons multi-dates entre des images provenant du même capteur ou de satellites différents. Nous avons utilisé le module 5S développé par le laboratoire d'optique atmosphérique de Villeneuve d'Ascq (Kergomard 2000). N'ayant pas réalisé de mesures de référence sur le terrain au spectroradiomètre à la date d'acquisition de l'image, nous nous sommes basés sur les valeurs par défaut proposées dans le module 5S. Les images étant livrées en compte numérique, la première étape consiste à les passer en luminance. L'étape suivante est la transformation en réflectance exo-atmosphérique, puis le passage de la réflectance exo-atmosphérique en réflectance au sol.

5.5.1.3- Corrections géométriques

La dernière étape consiste à projeter l'image initialement en UTM WGS 84 en RFG Lambert 93 qui correspond à la projection utilisée en France. Puis elle est ortho-rectifiée à partir de la

BDORTHO® de l'IGN en prenant une dizaine de points de calage uniformément sur toute la surface de l'image.

Afin de simplifier la comparaison des résultats entre images et la rapidité des traitements, nous avons découpé chaque scène selon l'emprise des mosaïques réalisées à partir de la BDORTHO® IRC (Annexe 3).

5.5.2- Données auxiliaires mobilisées

Suivant la qualité spatiale et spectrale de l'image, nous avons utilisé tout ou partie des données auxiliaires à disposition (Tableau 10 et 11).

5.5.3- Présentation du réseau hiérarchique de classification de l'image SPOT

Le nombre de bandes spectrales de l'image SPOT étant plus important que celui de la BDORTHO® IRC, nous avons testé l'apport d'une classification supervisée (SVM, MaxLike) et non supervisée (K-Means) sous ENVI. Mais nous avons écarté ces méthodes qui ne nous ont pas apporté de résultats suffisamment satisfaisants, l'aspect poivre et sel et la confusion entre classes étant beaucoup trop importants. Nous avons donc uniquement travaillé en approche orientée-objet pour développer la méthodologie qui va être présentée dans les paragraphes suivants.

Les procédures de classification et le catalogue complet des traitements est disponible en annexe 7. Il est le résultat de la concaténation des traitements réalisés sur les 3 sites tests. La reproductibilité de ce réseau hiérarchique a été vérifiée sur le site de validation du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay (Annexe 9). Pour les classes dont la reproductibilité n'était pas avérée, de nouveaux paramètres de classifications ont été recherchés jusqu'à ce qu'on considère que les résultats de la classification soient satisfaisants. Les surfaces totales (km²) sur lesquelles ont été effectués les traitements par site sont disponibles dans le tableau 15.

	Menez-Hom	Sangsurière	Sauzaie-Jaunay	Lessay
SPOT5	105	21	49	144

Tableau 15 : Superficie en km² des images SPOT traitées

Les procédures de classification sont composées de 3 étapes successives (Figure 16), qui correspondent comme pour la BDORTHO® IRC, aux étapes de segmentations successives qui sont appliquées à l'image (Tableau 16).

	Informations utilisées	Echelle	Couleur	Forme
1 (Chessboard)	Bâti, routes, surfaces en eau, plantations, sable dunaire, zone intertidale, parcellaire	100 000	/	/
2 (Multirésolution)	Forêts, haies, fourrés nains, sables dunaire, zones à dominante humide, zone intertidale	1	0,9	0,5
3 (Chessboard)	Parcellaire, zones à dominante humide	100 000	/	/

Tableau 16 : Paramètres de segmentation pour l'image SPOT 5

Le processus de traitement développé à partir des images SPOT est assez similaire à celui de la BDORTHO® IRC. Les remarques faites pour l'un sont donc valables pour l'autre. Deux différences cependant :

- Les procédures de classification issues des images SPOT ne sont constituées que de trois étapes. La résolution de l'image nous oblige, dès l'étape 2, à segmenter en petits objets pour identifier correctement les différentes végétations.
- Nous intégrons davantage la radiométrie pour différencier les végétations (nombre de bandes spectrales plus élevée).

5.6- Worldview-2

Cette image a été traitée selon une méthode différente (Annexe 10). N'ayant acquis cette image que sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay, la reproductibilité de ce traitement n'a pu être testée, mais il a cependant été développé dans cet objectif.

5.6.1- Prétraitements

L'image Worldview-2 livrée par Digitalglobe®, est ortho-rectifiée pour corriger les déformations liées au relief, et géoréférencée en UTM WGS 84. En complément, des corrections radiométriques ont été appliquées pour convertir les valeurs numériques en luminance exo-atmosphériques. Des prétraitements supplémentaires ont été apportés pour améliorer la qualité de l'image.

5.6.1.1- Fusion de l'image Worldview-2

L'image Worldview-2 a été acquise simultanément en mode multispectral et panchromatique. La bande du panchromatique a été fusionnée avec chacune des 8 bandes multispectrales afin de combiner la résolution spatiale de la bande panchromatique avec la résolution spectrale des 8 bandes multispectrales (Figure 17). La méthode de fusion Gram-schmidt a été utilisée avec un ré-échantillonnage au plus proche voisin. L'image résultante possède donc une résolution de 50 cm. Cependant la profondeur spectrale est dégradée, ce qui peut affecter la séparabilité de certaines formations végétales.

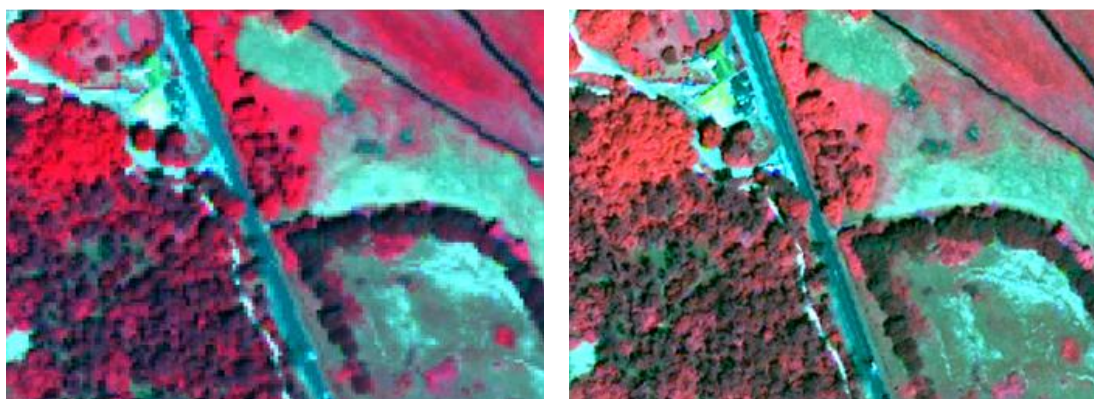


Figure 17 : Extrait sur le site des dunes de la Sauzaie de l'image non fusionnée (gauche) et fusionnée (droite)

5.6.1.2- Corrections atmosphériques

Les images Worldview-2 sont livrées en radiance relative. Il est nécessaire de les corriger radiométriquement afin de passer de valeurs de radiance relative à des valeurs de réflectance au sol. Les corrections atmosphériques permettent de dériver des variables biophysiques et d'effectuer des analyses multitemporelles entre différentes données de télédétection.

Les corrections atmosphériques ont été effectuées à l'aide du module FLAASH disponible dans le logiciel ENVI.

5.6.1.2- Corrections géométriques

Nous avons converti l'image initialement en UTM WGS 84, en RFG Lambert 93. Des corrections géométriques supplémentaires ont été apportées à l'image Worldview-2 par comparaison avec la BDORTHO® de l'IGN qui a servi d'image de référence. Dix-huit points de calages répartis de façon homogène sur l'ensemble de l'image, ont été sélectionnés et une transformation de 1^{er} ordre a été appliquée. L'erreur moyenne obtenue est inférieure à 1 pixel.

5.6.2- Données auxiliaires mobilisées

Suivant la qualité spatiale et spectrale de l'image, nous avons utilisé tout ou partie des données auxiliaires à disposition (Tableau 10 et 11).

5.6.3- Présentation du réseau hiérarchique de classification de l'image Worldview-2

La résolution spatiale et le nombre de bandes spectrales de l'image Worldview-2 étant meilleurs que ceux de la BDORTHO® IRC et SPOT5, nous avons donc pu combiner une classification supervisée de type pixel à une classification de type orientée-objet (Figure 18). L'ensemble des procédures de classification et le catalogue complet des traitements est disponible en annexe 8. N'ayant acquis une image que sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay, la reproductibilité n'a donc pu être vérifiée sur d'autres sites. Les traitements ont été effectués sur une surface totale de 49 km². L'ensemble des traitements ont été réalisés dans un premier temps sur l'image fusionnée puis dans un second temps sur l'image multispectrale afin d'évaluer l'intérêt de la fusion.

Les procédures de classification sont constituées de 3 étapes successives (Figure 18). L'étape 1 consiste à appliquer sur l'image une classification supervisée basée sur le pixel afin d'exploiter au mieux l'information spectrale contenue dans les 8 bandes. Dans les étapes 2 et 3, la classification a été intégrée et améliorée dans une démarche orientée-objet avec une prise en compte de l'information contextuelle, de forme, de couleur et de texture. Les étapes 1 et 2 nous permettent de réaliser de grands ensembles qui sont ensuite déclinés dans l'étape 3 jusqu'au niveau typologique le plus fin que nous autorise l'image.

Après avoir testé plusieurs algorithmes, le choix s'est porté sur un mode de classification supervisé par maximum de vraisemblance qui a fourni les meilleurs résultats. 282 échantillons d'entraînement homogènes ont été sélectionnés à partir de relevés de terrain et par photo-

interprétation de l'image Worldview-2 (Figure 19). Les classes prairies fauchées, cultures1, cultures2 et ombres non présentes dans la typologie ont été ajoutées en raison de leurs signatures spectrales particulières, puis reclassées lors de la classification orientée-objet.

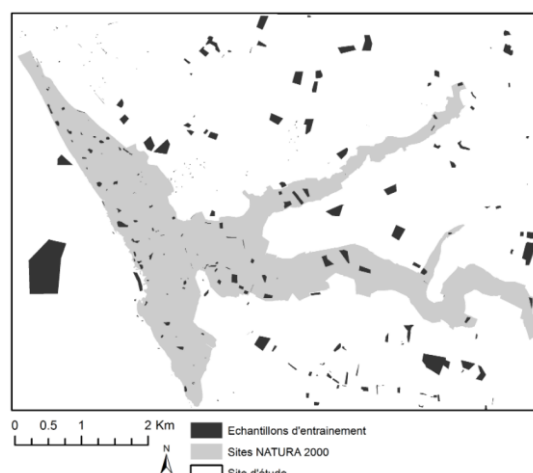


Figure 19 : Localisation des échantillons d'entraînement pour la classification supervisée

C'est au cours des étapes 2 et 3 qu'on applique la classification de type orientée-objet, qui permet d'affiner la classification de type pixel en intégrant des critères de contexte, de couleur, de forme et de texture. Tout d'abord l'image Worldview-2 a été segmentée afin d'en dériver des objets homogènes. Le choix des paramètres de segmentation a été fait de façon à obtenir les objets les plus larges possibles tout en restant suffisamment fins pour ne pas intégrer différentes formations végétales (Tableau 17).

DONNÉES	ÉCHELLE	FORME	COMPACITÉ
Multispectrales	20,0	0,1	0,5
Fusionnées	40,0	0,1	0,5

Tableau 17 : Paramètres de segmentation multirésolution utilisés sur les images multispectrales et fusionnées

Ces objets ont ensuite été croisés avec la classification pixel afin d'attribuer la classe majoritaire à chaque objet (Figure 20), ce qui a permis d'éliminer l'effet « poivre et sel » de la classification pixel. Les objets appartenant à la classe prairies fauchées ont été affectés aux prairies et pelouses et les objets classés en cultures 1 et cultures 2 ont été reclassés en cultures.

Les couches thématiques ont été intégrées à l'étape 2 afin de délimiter de grands ensembles et à la fin de l'étape 3 afin d'améliorer la classification. L'intégration de critères de contexte et de forme est intéressante car, contrairement aux caractéristiques spectrales, leurs valeurs sont invariantes quel que soit le site, le type d'image et la date d'acquisition. En revanche, le critère de texture peut varier suivant la résolution de l'image.

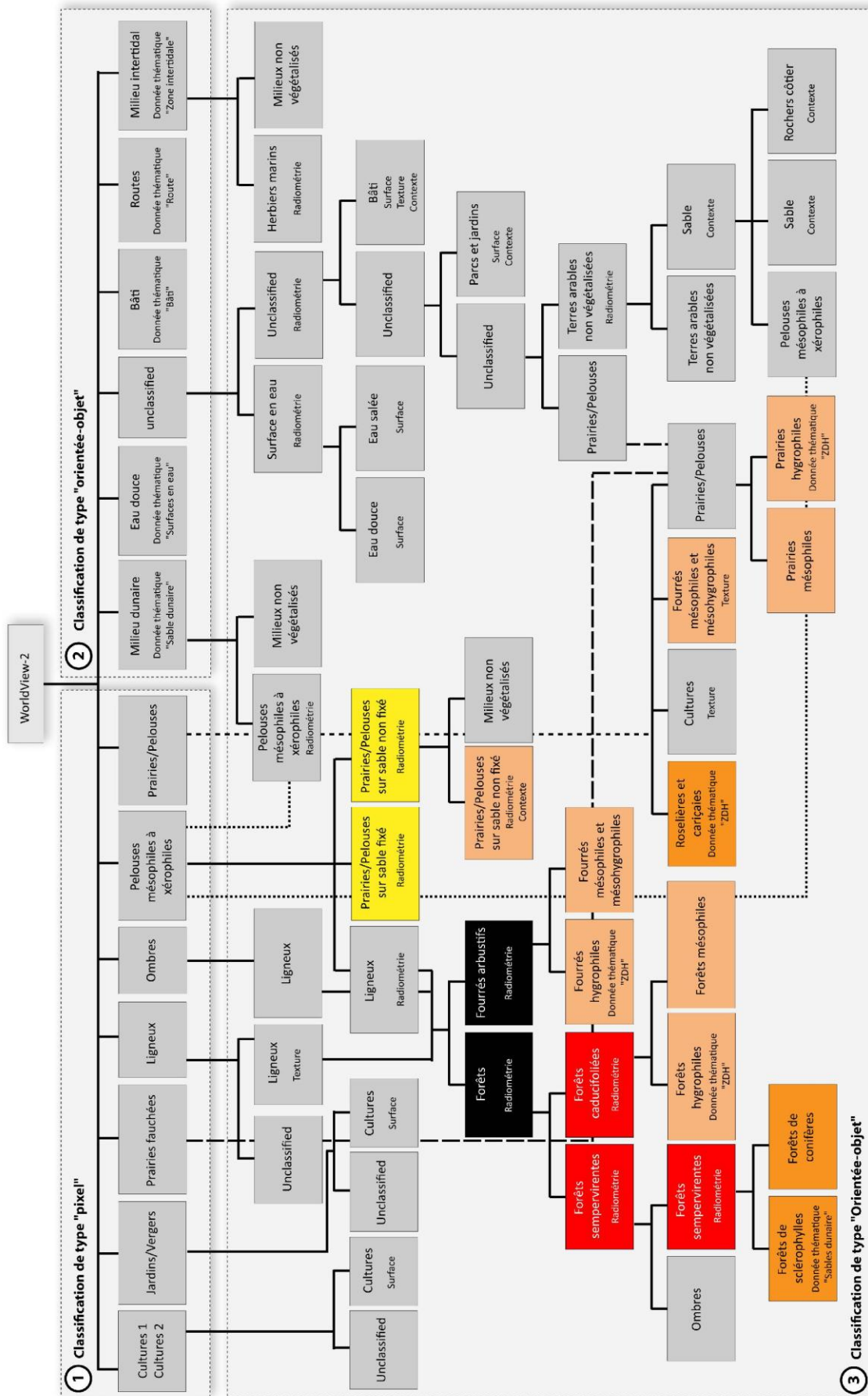


Figure 18 : Diagramme méthodologique élaboré à partir de l'image WorldView-2 (les couleurs font le lien avec les différents niveaux de la typologie emboîtée)

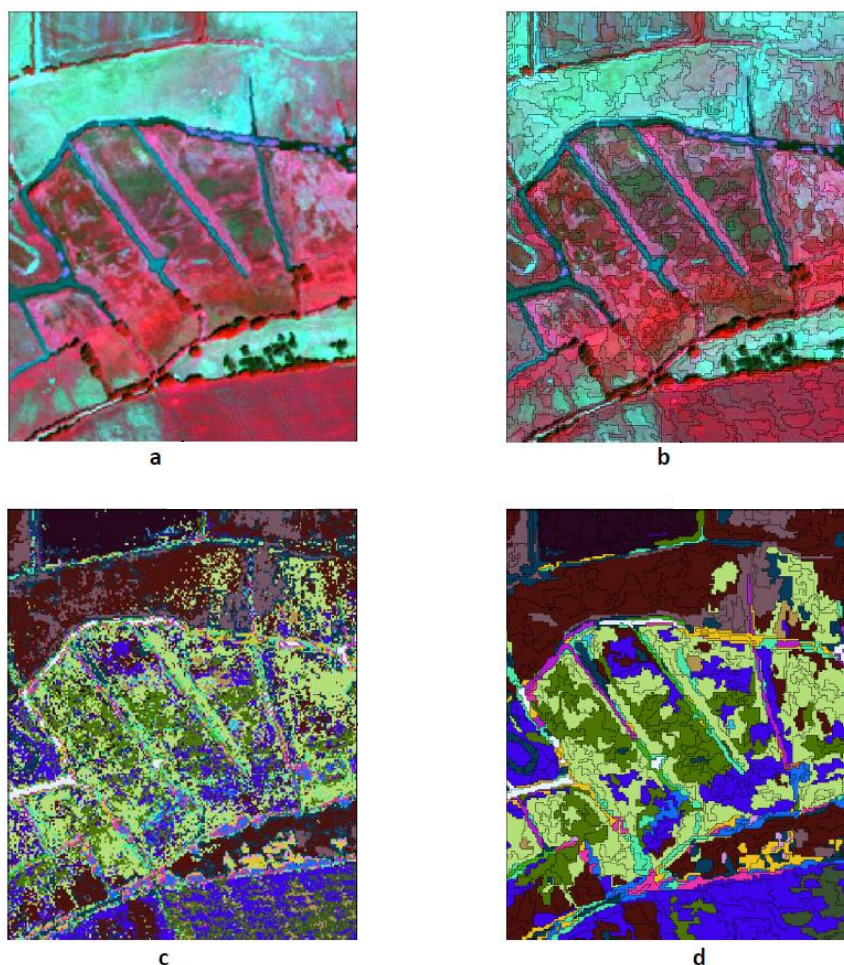


Figure 20 : Procédure d'attribution de la classe majoritaire aux objets

(a : image Worldview-2 ; b : segmentation avec création d'objets ; c : classification de type pixel ; d : croisement de la classification pixel avec les couche objet)

5.7- Amélioration de la qualité de la classification finale

Suivant l'utilisation qui sera faite de la classification, une phase de « nettoyage » peut être intégrée au processus avant l'export vers un logiciel de SIG.

- Si la classification est utilisée pour produire une carte de localisation des végétations au 1/25 000, il est nécessaire de réaffecter les plus petits objets aux objets voisins avec lesquels ils partagent la plus grande surface de contact, afin d'améliorer la lisibilité de la carte. La taille minimale de l'objet sera fonction de la résolution de l'image ayant servi à produire la classification. Pour les images SPOT nous avons réaffecté tous les objets dont la taille est inférieure à 10 pixels. Pour la BDORTHO® IRC et l'image Worldview-2 nous avons réaffecté tous les objets dont la taille est inférieure à 100 pixels.
- Si la classification est utilisée pour produire des statistiques sur les végétations, il faudra alors conserver la totalité des objets.
- Enfin, si la classification est utilisée localement, à l'échelle d'un site par exemple (1/5 000) pour connaître la répartition des végétations, il faudra la aussi conserver la totalité des objets ayant été identifiés.

Les objets classés en ombres ont été fusionnés avec l'objet voisin avec lequel ils partagent

la plus grande longueur de contact.

Concernant l'image Worldview-2, les objets appartenant aux classes cultures, terres arables, prairies mésophiles et prairies hygrophiles ont été dilatés jusqu'aux limites parcellaires. Cette étape ne doit être mise en œuvre que dans le cas de cartographie à moyennes échelles (1/25 000) sous peine de perdre des informations au niveau de la parcelle. A des échelles plus grandes il est important de conserver la totalité de l'information identifiée, les différences au sein d'une même parcelle pouvant correspondre à une réalité sur le terrain.

5.8- Validation

Pour évaluer les résultats des classifications, nous avons élaboré des matrices de confusion qui comparent les objets obtenus par classification avec les points de référence. Une série de paramètres statistiques est ensuite calculées à partir des totaux de lignes et de colonnes de la matrice, pour chaque classe individuellement et pour leur ensemble (Schwarzer *et al.* 2009).

Une matrice de confusion comprend les éléments suivants (Tableau 18) :

- En colonne les données des objets issus de la classification.
- En lignes les données des points de référence.
- La précision totale désigne le nombre d'objets bien classés divisé par le nombre total d'individus.
- Le taux de sur-détection, calculée selon les colonnes, correspond à la répartition des objets d'un groupe, issue de l'interprétation de données de télédétection, dans les diverses classes des données de référence.
- Le taux de sous-détection, calculée selon les lignes, est la répartition d'une classe de référence parmi les divers groupes issus de la classification (Girard et Girard 2010).

		CLASSIFICATION			Total	Sous-détection (%)
		1	2	3		
TERRAIN (Points de référence)	Milieus non végétalisés (1)	37	1	1	39	5,2
	Végétations artificielles (2)	3	23	8	34	32,4
	Végétations naturelles et semi-naturelles (3)	2	19	160	181	11,7
	Total	42	43	169	254	16,4
	Sur-détection (%)	12	46,6	5,4	21,3	

Tableau 18 : Exemple de matrice de confusion

L'évaluation de la qualité des classifications a été effectuée par l'indice de Kappa dont la valeur est comprise entre 0 et 1. Ce coefficient tient compte des erreurs en lignes et en colonnes (Congalton *et al.* 1991). Il permet une évaluation globale mais aussi au niveau de chaque classe, et il rend compte des deux types d'erreurs : déficit et excédent (Girard et Girard 2010).

- Si la classification est parfaite : Kappa = 1
- Si la proportion correcte observée est plus grande que la proportion correcte attendue due au hasard : Kappa > 0
- Si la proportion correcte observée est inférieure à la proportion correcte attendue due au hasard : Kappa < 0 (Pontius 2000).

Pour une classification donnée, un coefficient de Kappa supérieur à 0,8 indique une très bonne qualité de classification, un coefficient compris entre 0,6 et 0,8 indique une classification de bonne qualité, en dessous de 0,6 la qualité de classification est faible (Annexe 10).

Nos données de validation (Annexe 11) sont issues de trois sources :

- points GPS acquis sur le terrain en 2011 et 2012 (Tableau 19),
- relevés phytosociologiques récents réalisés par le CBN de Brest,
- photo-interprétation à partir de cartes d'habitats existantes (Durfort 2009 ; Filloi *et al.* 2003 ; Glemarec et Le Bellour 2010 ; Le Rest *et al.* 2009) et des différentes images (milieux non végétalisés, milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies, végétations artificielles).

Nous nous sommes basés sur un échantillonnage au hasard pour la collecte de points sur le terrain (Girard et Girard 2010). Le nombre de points est variable d'une classe à une autre. Il est fonction de la représentativité de la végétation sur l'ensemble du site et de son intérêt. Ainsi les végétations très peu représentées mais d'intérêt comme les roselières et cariçaies ou les tourbières à chaméphytes ont entre 3 à 8 points de validation. En revanche, les forêts mésophiles ou hygrophiles, souvent très bien représentées, ont entre 10 à 25 points de validation. Nous avons cherché à conserver un même ordre de grandeur entre toutes les classes. Les points de validation ont été levés sur l'ensemble des sites, dans des végétations homogènes et de surface suffisamment étendues de façon à ce que ces points puissent servir à valider aussi bien les cartographies issues de la BDORTHO IRC® que celles issues des images SPOT5 et Worldview-2. Nous avons cependant été amenés à supprimer quelques points pour les images anciennes (4 ans) du fait des changements survenus depuis l'acquisition de l'image.

	Complexe du Menez-Hom	Marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie	Dunes de Sauzaie et marais du Jaunay	Havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay
Dates	25 juillet et 03 août 2011 26 et 27 avril 2012	27 et 28 juillet 2011 16 juin 2012	01 et 02 août 2011 24 avril 2012	17 et 18 juin 2012
Nombre de points de validation pour la BDORTHO® IRC	254	210	244	465
Nombre de points de validation pour SPOT5	256	213	238	477
Nombre de points de validation pour Worldview-2			243	

Tableau 19 : Dates des campagnes de prospection et nombre de points de validation par site au total

Pour réaliser la validation, nous avons confronté les classifications issues des traitements automatiques avec les points de validation. Des matrices de confusion ont été réalisées selon la méthodologie proposée par Girard et Girard (2010). Ces matrices ont été réalisées à 3 niveaux de validation (Tableaux 20). Chaque classe de la typologie de travail a été identifiée par un numéro pour faciliter l'étape de validation.

Niveau 1	Code	Niveau 2	Code	Niveau 3	Code
Milieux non végétalisés	1		1		1
Végétations artificielles	2	Cultures	21		210
		Plantations	22		220
		Parc et jardins	23		230
Végétations naturelles et semi-naturelles	3	Forêts	31	Forêts mésophiles (caducifoliées)	311
				Forêts hygrophiles (caducifoliées)	312
				Forêts de conifères	313
				Forêts de sclérophylles	314
				Forêts mixtes	315
		Fourrés arbustifs	32	Fourrés mésophiles	321
				Fourrés hygrophiles	322
		Fourrés nains	33	Landes et garrigues	330
				Tourbières à chaméphytes	331
				Fourrés crassulescents	332
		Végétations aquatiques marines	34	Herbiers marins	340
		Végétations herbacées	35	Prairies mésophiles	351
				Prairies hygrophiles	352
				Pelouses sur sable non fixé	353
				Pelouses sur sable fixé	354
				Roselières et cariçaies	355
				Franges et lisières	356
				Prés salés	357
		Milieux aquatiques avec ou sans prairies et pelouses amphibies	36		360

Tableau 20 : Description des niveaux de classification

Le **niveau 1** correspond à l'occupation du sol et permet d'évaluer la qualité de la classification des végétations naturelles et semi-naturelles.

Le **niveau 2** correspond aux grands types de végétations et permet d'évaluer la qualité de la classification végétations correspondant pour la majorité aux classes du niveau 1 de la typologie du CBN de Brest.

Enfin le **niveau 3** correspond types de formations végétales, et correspond au niveau le plus fin de la typologie auquel on descend à partir de nos images.

Ces trois niveaux ne correspondent pas à une échelle de cartographie. Les classifications résultantes peuvent toutes les trois être utilisées au 1/25 000, le niveau 2 étant la concaténation des objets du niveau 3, et le niveau 1 étant la concaténation des objets du niveau 2. On retrouve bien dans cette déclinaison, l'emboîtement des classes de la typologie initiale du CBN de Brest.

1- Bilan du traitement de la BDORTHO® IRC

1.1- Niveau 1

- Les cartes issues des classifications au niveau 1 de validation ainsi que les matrices de confusions sont disponibles en annexes 12, 15, 18 et 21.

Au niveau 1, les indices de kappa pour tous les sites sont assez bons et varient entre 0,72 et 0,81 (Tableau 21).

La classification des **milieux non végétalisés** (routes, bâti, sable, terres non cultivées) est excellente. Les taux de sous-détection sont inférieurs à 10%, et les taux de sur-détection sont acceptables, puisqu'ils varient entre 3 et 13%.

Nous pouvons faire le même constat avec la classe des **végétations naturelles et semi-naturelles** dont les taux de sous-détection sont inférieurs à 12% et de sur-détection inférieurs à 6%.

En revanche nous obtenons des résultats moyens pour les **végétations artificielles** (plantations, parcs et jardins, cultures), les taux de sous-détection (22 à 38%) et de sur-détection (48%) sont assez élevés. Nous verrons dans les niveaux suivants les raisons de ces confusions.

1.2- Niveau 2

- Les cartes issues des classifications au niveau 2 de validation ainsi que les matrices de confusions sont disponibles en annexes 13, 16, 19 et 22.

Au niveau 2, les coefficients kappa diminuent (0,62 à 0,77) mais restent cependant de bonne qualité. Si on calcule ce coefficient uniquement pour les classes des végétations naturelles et semi-naturelles, il varie de 0,57 à 0,78 (Tableau 21).

Les **cultures** (24 à 47% de sous-détection ; 36 à 65% de sur-détection) sont très mal identifiées, elles se confondent majoritairement avec les milieux non végétalisés, les prairies et les fourrés nains (landes).

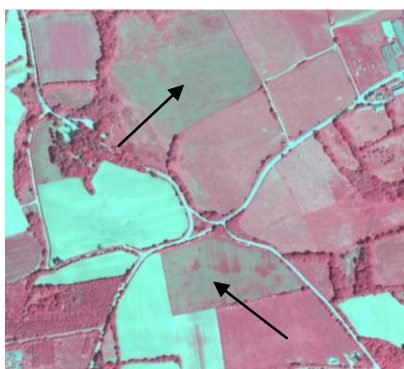


Figure 21 : Exemple de cultures en début de développement qui sont classées en landes

La confusion avec les milieux non végétalisés (terres non cultivées), nous montre l'intérêt d'avoir des points de validation proches de la date d'acquisition des images. Les images acquises trop tôt dans la saison montrent une majorité de cultures en début de développement. Or les cultures en début de développement ont une réflectance similaire à celle des fourrés nains (landes), ce qui engendre de nombreuses confusions (Figure 21).

Les **plantations** (20 à 67% de sous-détection) se confondent avec les forêts dans les zones d'étude testées. Ce sont exclusivement les petites plantations de type verger qui sont concernées par cette confusion (elles n'ont pas été identifiées dans la couche de l'IFN utilisée dans le traitement).

Les **parcs et jardins** sont très bien identifiés (10 à 29% de sous-détection).

Les **forêts** sont très bien identifiées par rapport à la référence (0 à 13% de sous-détection), mais les erreurs de sur-détection montrent de nombreuses confusions avec les fourrés arbustifs.

Le même constat est fait avec la classification des **fourrés arbustifs** (64 à 100% de sous-détection). Ils se confondent largement avec les forêts. Cette confusion est due à la définition donnée par les phytosociologues aux fourrés arbustifs et aux forêts qui n'est pas adaptée à une classification par télédétection. En effet, selon cette définition, ces végétations se distinguent des forêts par un critère de hauteur (+/- 7 mètres), or avec les données à notre disposition il nous est impossible de mettre en évidence ce critère de taille.

Les **fourrés nains** sont très bien identifiés (12 à 16% de sous-détection), avec toutefois quelques confusions avec les forêts et les végétations herbacées.

Les **herbiers marins algaux** sur les replats rocheux de Vendée sont très bien identifiés.

Sur les sites des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay, du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay, ainsi que sur le site des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie, les **végétations herbacées** sont assez bien identifiées avec respectivement 13, 22 et 24% de sous-détection. En revanche nous observons sur le site du Menez-Hom un résultat de 61% de sous-détection pour ces végétations. Ce résultat s'explique par la forte confusion entre les cultures et les végétations herbacées (prairies). Nous expliquerons ces différences de résultats et ces confusions au niveau suivant. Il faut toutefois noter que les taux de sur-détection pour les 4 sites sont inférieurs à 15%.

La classe des **milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies** est quant à elle très bien identifiée (3 à 13% de sous-détection).

1.3- Niveau 3

→ Les cartes issues des classifications au niveau 3 de validation ainsi que les matrices de confusions sont disponibles en annexes 14, 17, 20, 23.

Au niveau 3 de validation, les coefficients kappa ont encore diminué mais sont toujours corrects. Ils varient entre 0,59 et 0,71 suivant les sites et entre 0,51 et 0,70 pour les seules classes des végétations naturelles et semi-naturelles (Tableau 21).

Nous allons nous attarder pour ce niveau, uniquement sur les végétations naturelles et semi-naturelles ; les milieux non végétalisés et les végétations artificielles ayant déjà été traitées dans les niveaux précédents. Nous ne reviendrons pas non plus sur les herbiers marins et les milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies dont les résultats restent identiques au niveau 2, puisque nous ne déclinons pas ces classes à des niveaux plus fins de la typologie.

Les **forêts caducifoliées** en contexte mésophile (18 à 46% de sous-détection) ou hygrophile (0 à 39% de sous-détection) sont globalement bien identifiées par rapport à la référence, malgré quelques confusions avec les forêts de conifères. Cela s'explique par le fait que les ombres, nombreuses sur les ortho-images, ont une réflectance proche de celle des conifères et sont ainsi classées comme telle. D'où la surreprésentation des forêts de conifères. Nous avons essayé plusieurs techniques pour classer ces ombres afin d'éviter ces confusions, mais sans résultat concluant. On constate par ailleurs de fortes confusions avec les fourrés arbustifs, qui sont sous-détectés au détriment des forêts.

Sur la plupart des sites, les **forêts de conifères et de sclérophylles** semblent plutôt bien classées malgré une sur-détection de ces végétations due aux ombres.

Dans cette procédure de classification nous n'identifions pas de **forêts mixtes** avec la BDORTHO® IRC, même si on en rencontre sur certains sites. Cela s'explique par le fait que notre paramètre d'échelle est suffisamment fin pour identifier quasiment chaque arbre. Chaque objet « arbre » est donc attribué soit à la classe des forêts caducifoliées soit à la classe des forêts sempervirentes suivant sa réflectance dans le proche infrarouge.

La détection des **fourrés arbustifs** est médiocre. Seul quelques fourrés de bourdaine en mélange avec de la fougère aigle sont en partie identifiés sur les landes, et certains fourrés à Saule sur les dunes. Tous les autres fourrés se retrouvent en mélange soit avec les forêts caducifoliées soit avec les forêts sempervirentes avec qui ils sont alors confondus.

Les **landes** sont bien identifiées sur le site du Menez-Hom avec seulement 22% de sous-détection. Lorsqu'il existe des confusions, elles interviennent avec des forêts de conifères, au niveau des zones de landes piquetées de pins (Figure 22). Lorsque ce piquetage devient suffisamment dense, les objets sont classés en forêts de conifères et non plus en lande.

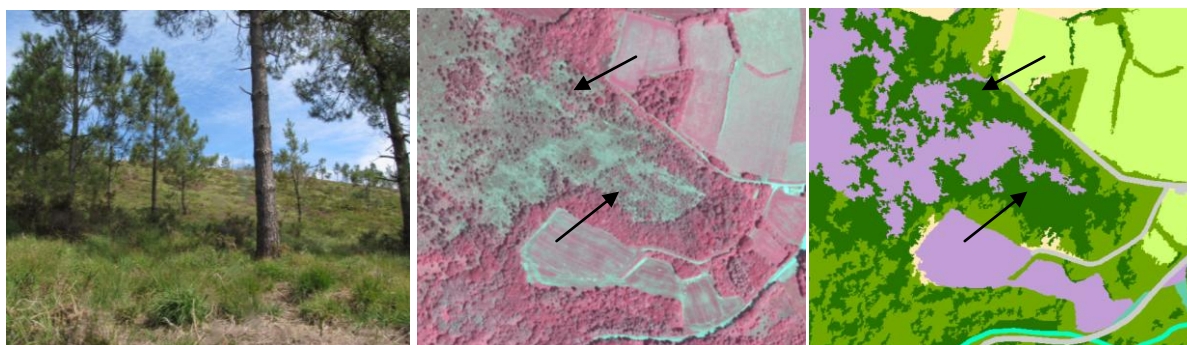


Figure 22 : Exemple de zone piquetée par les pins sur le site du Menez-Hom

Sur le site de la Sangsurière, ce sont des landes à fougère aigle et ajonc qui dominent avec quelques callunes et Ericacées. La physionomie de cette végétation ressemblerait donc plus à des fourrés qu'à de la lande. Au moment de la prise de vue ces fourrés ont la même réflectance que les pins, d'où le classement de ces landes en forêt de conifères (Figure 23).

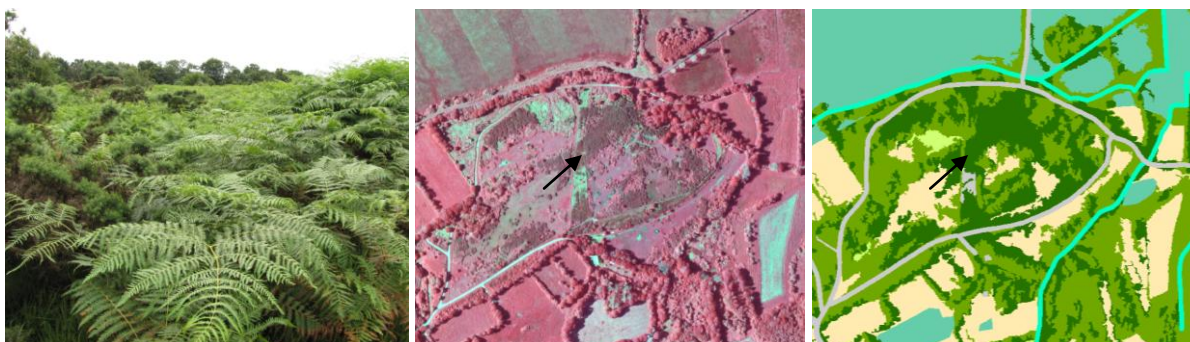


Figure 23 : Extrait de la classification sur la zone du mont de Doville (Site de la Sangsurière)

Sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay, nous observons de fortes confusions entre les landes et les tourbières, ces dernières étant surreprésentées au détriment des landes. La couche des zones à dominante humide ayant son application optimale au 1/50 000, elle semble insuffisante pour identifier avec précision les végétations hygrophiles sur des surfaces réduites.

Les **fourrés crassulescents** du littoral semblent bien identifiés par rapport aux points de référence (22% de sous-détection) mais on constate cependant que ces végétations présentent de nombreuses confusions avec les végétations des prés salés.

Les **prairies mésophiles** sont très mal identifiées (68 à 82% de sous-détection). Elles présentent de nombreuses confusions avec les cultures et quelques confusions avec les prairies hygrophiles. Ces dernières étant identifiées grâce à la couche des zones à dominante humide, c'est donc le même problème que cité précédemment.

Toutefois, lorsqu'il s'agit d'identifier des **végétations hygrophiles** sur de grandes surfaces, cette couche nous donne de bons résultats. Sur des sites comme les marais de la Sangsurière et les marais du Jaunay, les taux de sous-détection sont inférieurs à 2%. Sur le site du Menez-Hom et du havre de Saint-Germain-sur-Ay où cette classe n'est pas majoritaire, les taux de sous-détection sont respectivement de 32 à 36%.

Les **pelouses sur sable non fixé** et les **pelouses sur sable fixé** sont très bien identifiées sur le site des dunes de la Sauzaie avec respectivement 5 à 13% de sous-détection et des erreurs de sur-détection inférieures à 12%. Nous aurions obtenu des résultats similaires sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay si l'image avait été plus récente. En 2007 (date de prise de vue de l'image aérienne) les pelouses sur sable non fixé étaient quasiment absentes alors qu'en 2012 (date de récolte des échantillons sur le terrain) ces végétations s'étaient fortement développées.

Les végétations de **pré salé**, malgré une répartition assez nette sur le terrain, ont été difficiles à extraire. Il est vrai que le seul site (Havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay) où ce type de végétation existait était pâturé et les végétations de prés salés présentaient des aspects très variables suivant l'intensité du pâturage. De ce fait, une même végétation peut avoir une texture et une réflectance différente. Pour ces végétations nous sommes donc restés au niveau du groupe (13% de sous-détection).

Les **roselières et cariçaies** et les **mégaphorbiaies** en intérieur n'ont pas été identifiées. Sur ces sites, ces deux types de végétations s'étendent sur de petites surfaces et il est donc difficile même par photo-interprétation de les identifier (Figure 24). En classification automatique, elles se retrouvent donc en mélange avec des prairies, des fourrés arbustifs ou des forêts. En revanche les roselières et cariçaies en haut des prés salés sont sous-détectés à 58%, et sur-détectés à 54%.

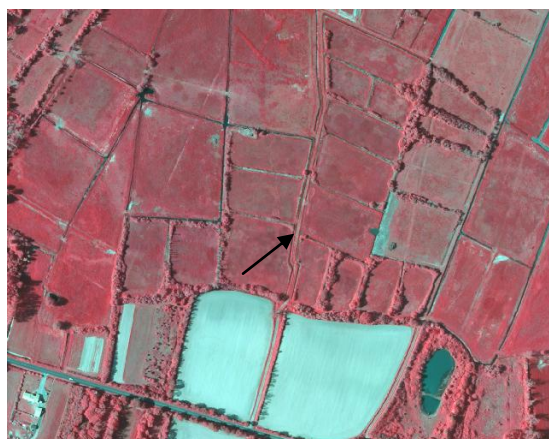


Figure 24 : Linéaire de roselière en bordure d'un fossé sur les marais du Jaunay (BDORTHO® IRC)

1.4- Conclusions

La méthodologie mise en place pour le traitement de la BDORTHO® IRC, nous a permis de classer de façon satisfaisante un certain nombre de grands types de végétations.

Malgré une qualité spatiale très intéressante, cette donnée ne nous a pourtant pas permis de descendre à des niveaux très fins de la typologie emboîtée. La précision des objets identifiés permet cependant une exploitation de la classification entre le 1/5 000 et le 1/25 000. Par ailleurs il faut noter que les résultats au niveau 3 (typologie de « travail ») ne sont pas satisfaisants pour tous les sites (Tableau 21). Il serait donc opportun de n'identifier les végétations que jusqu'au niveau 2, ou de suivre les quelques recommandations en partie 4.5, pour améliorer la qualité de la classification au niveau 3.

	Sites tests						Site de validation	
	Complexe du Menez-Hom		Marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie		Dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay		Havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay	
	Toutes classes confondues	Végétations naturelles et semi-naturelles	Toutes classes confondues	Végétations naturelles et semi-naturelles	Toutes classes confondues	Végétations naturelles et semi-naturelles	Toutes classes confondues	Végétations naturelles et semi-naturelles
Niveau 1	0,72		0,78		0,81		0,75	
Niveau 2	0,68	0,72	0,62	0,57	0,77	0,78	0,75	0,72
Niveau 3	0,60	0,60	0,59	0,51	0,71	0,71	0,65	0,61

Tableau 21 : Bilan des coefficients kappa pour chaque site et chaque niveau de validation

Des tests supplémentaires devraient être menés sur un autre site pour vérifier la reproductibilité des traitements pour l'identification des prés salés, des fourrés crassulescents et des roselières. Ces types de végétations n'étant présents que sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay.

2- Bilan du traitement de l'image SPOT5

2.1- Niveau 1

- Les cartes issues des classifications au niveau 1 de validation ainsi que les matrices de confusions sont disponibles en annexes 12, 15, 18 et 21.

Au niveau 1 de validation de la classification, les coefficients kappa sont corrects pour le site des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie, des dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay et du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay puisque les coefficients sont respectivement de 0,74, 0,63 et 0,71. En revanche celui du Menez-Hom n'est seulement que de 0,56 (Tableau 22).

Globalement les **milieux non végétalisés** sont bien identifiés (18 à 42% de sous-détection). Les confusions que l'on observe avec les végétations artificielles (cultures), sont dues à l'écart important entre la date des relevés sur le terrain et les dates de prise de vue.

Les **végétations artificielles** sont très mal identifiées (38 à 59% de sous-détection). Les confusions avec les milieux non végétalisés sont dues au même problème cité ci-dessus. C'est avec les végétations naturelles et semi-naturelles que l'on observe le plus de confusions, et plus particulièrement entre les cultures et les prairies.

Les **végétations naturelles et semi-naturelles** sont très bien classées quel que soit le site puisque les taux de sous et de sur-détection sont inférieurs à 13%.

2.2- Niveau 2

- Les cartes issues des classifications au niveau 2 de validation ainsi que les matrices de confusions sont disponibles en annexes 13, 16, 19 et 22.

Au niveau 2 de validation de la classification, les coefficients kappa changent peu mis à part pour les marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie où on passe d'un coefficient de 0,74 à 0,68. Si on calcule ces coefficients pour les classes des végétations naturelles et semi-naturelles, ils augmentent légèrement (0,63 à 0,79) (Tableau 22).

Comme nous l'avons vu au niveau 1, les cultures se confondent majoritairement avec les milieux non végétalisés et les végétations herbacées (46 à 67% de sous-détection). Seules certaines cultures comme le maïs s'identifient assez bien car elles ont une réflectance très prononcées dans le proche infrarouge. L'identification des cultures à partir des images SPOT5 est donc dépendante de la période d'acquisition de l'image. On obtient les plus mauvais résultats pour le site du Menez-Hom dont l'image a été acquise le 25 avril et les meilleurs résultats pour les sites dans la Manche dont l'image a été acquise le 31 juillet.

Nous obtenons des résultats similaires à ceux issus de la BDORTHO® IRC pour les **plantations**, les **parcs et jardins**, les **forêts**, les **fouffrés arbustifs**, les **végétations herbacées** et les **milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies**. Pour les classes ayant de mauvais résultats, les erreurs constatées sont dues aux mêmes problèmes que pour la BDORTHO® IRC. Les petites plantations de type verger ne sont pas répertoriées car non identifiées par l'IFN, les forêts sont largement surestimées au détriment des fouffrés arbustifs, et les prairies de la classe « végétation herbacée » se confondent avec les cultures.

Les **fouffrés nains** sont globalement bien identifiés (0 à 31% de sous-détection). Les quelques confusions avec les forêts et les fouffrés arbustifs sont dues aux points de validation qui ne se situent pas dans des zones suffisamment étendues et homogènes floristiquement. Il existe aussi

quelques confusions au niveau des landes piquetées par le pin (Figure 25).



Figure 25 : Extrait de l'image SPOT et de la classification sur le site du Menez-Hom

Nous n'avons que 50% des herbiers marins algaux qui sont bien classés, les autres points étant classés en milieux non végétalisés (mer). Ces erreurs s'expliquent par le fait que nos points de validation ne se situent pas dans des surfaces suffisamment étendues.

2.3- Niveau 3

→ Les cartes issues des classifications au niveau 3 de validation ainsi que les matrices de confusions sont disponibles en annexes 14, 17, 20, 23.

Pour ce troisième niveau de validation nous ne reviendrons pas sur les classes qui ont déjà été traitées aux niveaux précédents : les milieux non végétalisés, les cultures, les plantations, les parcs et jardins, les herbiers marins et les milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies. Ces classes n'ayant pas été déclinées au niveau 3, les résultats et remarques faites pour le niveau 2 sont toujours valables.

Les coefficients kappa au niveau 3 diminuent légèrement pour les 3 sites tests et fortement pour le site de validation (Tableau 22). Les coefficients pour les seules classes des végétations naturelles et semi-naturelles vont de 0,57 à 0,68.

Les résultats de la classification des **forêts caducifoliées** mésophiles (20 à 63% de sous-détection) et hygrophiles (27 à 57% de sous-détection) sont très variables d'un site à un autre. Pour les sites où existaient de fortes confusions avec les fourrés arbustifs comme les marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie, on retrouve ces confusions à ce niveau : les forêts mésophiles se confondent avec les fourrés mésophiles et mésohygrophiles, et les forêts hygrophiles se confondent avec les fourrés hygrophiles. Pour les autres sites, se sont essentiellement des erreurs dues à l'imprécision de la couche des zones à dominante humide, qui engendrent des confusions entre les forêts hygrophiles et mésophiles et une sur-détection des forêts mixtes.

Les **forêts de conifères** sont très bien identifiées avec seulement 0 à 22% de sous-détection.

Les **forêts de sclérophylles** à chêne vert et pin (46% de sous-détection), ne se rencontrent que sur le site des dunes de la Sauzaie. Les principales confusions interviennent au niveau des zones où c'est le chêne vert qui domine. Le chêne vert ayant une réflectance plus prononcée dans le proche infrarouge, cela engendre des confusions avec les forêts caducifoliées.

Les **forêts mixtes** dont nous n'avons relevé des points de validation que sur le site du

Menez-Hom, sont tous correctement classés par rapport à la référence, mais elles sont en fait largement sur-détectées à hauteur de 84%.

Au niveau 2, seuls les **fourrés** sur les dunes de la Sauzaie sont à peu près bien identifiés avec un taux de sous-détection de 56% des fourrés mésophiles et mésohygrophiles, et de 24% des fourrés hygrophiles. Sur les autres sites, ils se confondent avec les forêts caducifoliées, sempervirentes et mixtes.

L'identification des **landes** est très variable d'un site à un autre (0 à 76% de sous-détection). Les nombreuses confusions avec les tourbières à chaméphytes sont dues à l'imprécision de la couche des zones à dominante humide. On observe par ailleurs quelques confusions avec les fourrés arbustifs et les forêts de conifères.

Les **prairies mésophiles** qui comprennent les prairies permanentes et les prairies temporaires sont très mal identifiées (39 à 67% de sous-détection et 44 à 73% de sur-détection). Elles sont largement confondues avec les cultures et les prairies hygrophiles comme indiqué précédemment.

Les **pelouses sur sable non fixé** (6 à 17% de sous-détection) et les **pelouses sur sable fixé** (0 à 13% de sous-détection) sont très bien classées.

Avec les images SPOT nous n'avons pu identifier les mégaphorbiaies et les roselières et cariçaies.

Les végétations des **prés salés** sont correctement identifiées, avec un taux de seulement 6% de sous-détection. Nous rappelons que dans cette classe, pour les images SPOT, nous incluons les fourrés crassulés du bas schorre.

2.4- Conclusions

Globalement, étant donné la complexité de la typologie, les résultats obtenus à partir des images SPOT sont corrects (Tableau 22). Les classifications résultantes sont exploitables à l'échelle du 1/25 000 au 1/50 000. Si on s'attarde sur les résultats présentés dans le tableau 22, on s'aperçoit cependant qu'il serait opportun, pour ce type d'image, de se limiter au niveau 2 de classification. Sur un site très diversifié et de grande superficie (4 000 hectares) comme le havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay, un coefficient kappa bon au niveau 2, devient médiocre au niveau 3. Si on veut améliorer les résultats au niveau 3, nous conseillons de mettre en œuvre les propositions en partie 4.5.

	Sites tests						Site de validation	
	Complexe du Menez-Hom		Marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie		Dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay		Havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay	
	Toutes classes confondues	Végétations naturelles et semi-naturelles	Toutes classes confondues	Végétations naturelles et semi-naturelles	Toutes classes confondues	Végétations naturelles et semi-naturelles	Toutes classes confondues	Végétations naturelles et semi-naturelles
Niveau 1	0,56		0,74		0,63		0,71	
Niveau 2	0,55	0,63	0,68	0,69	0,64	0,72	0,72	0,79
Niveau 3	0,52	0,57	0,67	0,68	0,60	0,65	0,57	0,57

Tableau 22 : Bilan des coefficients kappa pour chaque site et chaque niveau de validation

3- Bilan du traitement de l'image Worldview-2

Les résultats qui vont être présentés maintenant sont issus du rapport de Sébastien Rapinel (Annexe 10) qui a élaboré et validé la méthodologie à partir des images Worldview-2 sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay. Ils sont présentés aux trois niveaux de validation pour l'image multispectrale et l'image fusionnée. Le but étant de montrer si les résultats sont plus concluants avec l'image fusionnée ou non.

3.1- Niveau 1

→ Les cartes issues des classifications au niveau 1 de validation ainsi que les matrices de confusions sont disponibles en annexe 18.

Au niveau 1 de validation, les coefficients kappa des classifications dérivées des images multispectrales et fusionnées sont très bons puisqu'ils s'élèvent respectivement à 0,90 et 0,88 (Tableau 23).

L'analyse des matrices de confusion pour l'image multispectrale et fusionnée met en évidence la bonne classification des **milieux non végétalisés** (4% de sous-détection).

Les **végétations artificielles** et les **végétations naturelles et semi-naturelles** sont bien classées aussi mais on note toutefois quelques confusions entre ces classes. Nous expliquerons ces confusions au niveau suivant. On peut noter que la précision des résultats obtenus est légèrement supérieure avec l'image multispectrale qu'avec l'image fusionnée.

3.2- Niveau 2

→ Les cartes issues des classifications au niveau 2 de validation ainsi que les matrices de confusions sont disponibles en annexe 19.

Au niveau 2, les coefficients kappa des classifications dérivées des images multispectrales et fusionnées sont toujours très bons avec des valeurs s'élevant respectivement à 0,85 et 0,82. Ce coefficient, calculé uniquement sur les classes des végétations naturelles et semi-naturelles reste quasiment identique et atteint respectivement 0,85 et 0,83 (Tableau 23).

L'analyse des matrices de confusion, pour l'image multispectrale et l'image fusionnée, met en évidence que la classe **culture** (24 à 29% de sous-détection) présente des confusions en particulier avec les végétations herbacées. Ces confusions s'expliquent par la similarité des signatures spectrales de certaines prairies et de certaines cultures à la date d'acquisition de l'image (25 mai 2011).

Les **plantations** sont assez bien classées (30 à 33% de sous-détection) mais on note quelques confusions avec les forêts dans les zones d'étude testées. Ce sont exclusivement les petites plantations de type verger qui sont concernées par cette confusion (elles n'ont pas été identifiées dans la couche de l'IFN utilisée dans le traitement).

Les **parcs et jardins** sont assez bien classés (10 à 33% de sous-détection).

Les résultats pour les **forêts** sont très bons, avec un taux de sous-détection de seulement 20 à 25%. Des confusions, majoritairement avec les fourrés arbustifs, existent cependant. Les erreurs de sous-détection et de sur-détection s'élèvent à 20 et 24% pour l'image multispectrale et 17 et 25% pour l'image fusionnée.

Le constat est similaire avec la classe des **fourrés arbustifs** (36 à 40% de sous-détection) qui se confondent avec les forêts.

Les **végétations herbacées** sont très bien classées (4% de sous-détection).

Enfin la classe des **milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies** est très bien identifiée avec la totalité des objets qui sont correctement classés par rapport à la référence et seulement 10% de sur-détection.

3.3- Niveau 3

→ Les cartes issues des classifications au niveau 3 de validation ainsi que les matrices de confusions sont disponibles en annexe 20.

Au niveau 3, les coefficients kappa des classifications dérivées des images multispectrales et fusionnées diminuent mais restent corrects, avec des valeurs respectives de 0,74 et 0,73. Le calcul de ce coefficient uniquement sur les classes des végétations naturelles et semi-naturelles atteint respectivement 0,66 et 0,67 (Tableau 23). Nous ne reviendrons pas ici sur les classes milieux non végétalisés, cultures, plantations, parcs et jardins, milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies qui n'ont pas été déclinées plus précisément au niveau 3.

Les **forêts mésophiles** (62% de sous-détection) se confondent majoritairement avec les forêts hygrophiles (33 à 44% de sous-détection). On observe aussi quelques confusions avec les fourrés arbustifs.

Les **forêts de conifères** sont en revanche bien identifiées, ainsi que les forêts de sclérophylles. On observe malgré tout, 30 et 38% de sur-détection pour les forêts sempervirentes qui présentent des confusions avec des fourrés mésophiles.

Les **fourrés mésophiles** sont assez bien identifiés, ce qui n'est pas le cas des fourrés hygrophiles. Dans les deux cas, on observe des confusions avec les forêts.

Les **prairies** mésophiles (43% de sous-détection) et hygrophiles (39 à 48% de sous-détection) sont moyennement bien identifiées. Ces végétations se confondent majoritairement entre elles et avec les roselières et cariçaies. On observe en effet des taux de sur-détection de 84 et 94% pour les roselières et cariçaies au détriment des prairies hygrophiles et mésophiles.

Les **pelouses sur sable non fixé et fixé** sont très bien identifiées avec seulement 6 à 9% de sous-détection et des erreurs d'excédents inférieures à 5%.

Les **roselières et cariçaies** sont largement sur-détectées avec 84 et 94% de sur-détection.

3.4- Conclusions

Les résultats que l'on obtient pour le traitement de l'image Worldview-2 sont très bons aux niveaux 1 et 2 (Tableau 23). Les résultats des classifications obtenues à partir du traitement de l'image en mode multispectral ou fusionné sont similaires.

		Multispectrale	Fusionnée
Niveau 1	Toutes les classes	0,90	0,88
	Toutes les classes	0,85	0,82
Niveau 2	Végétations naturelles et semi-naturelles	0,85	0,83

Niveau 3	Toutes les classes	0,74	0,73
	Végétations naturelles et semi-naturelles	0,66	0,67

Tableau 23 : Bilan des coefficients kappa pour chaque niveau de validation

Nous avons rencontré, comme pour les précédentes images, des difficultés à distinguer les prairies des cultures. A la date d'acquisition des images, certaines prairies venaient d'être fauchées, rendant leur caractérisation impossible. De plus la similarité spectrale et texturale entre certaines prairies mésophiles et des cultures a entraîné des erreurs de classification.

La caractérisation des végétations naturelles et semi-naturelles est de bonne qualité au niveau 2 de la typologie, même si des confusions existent entre les formations de type « Forêts » et « Fourrés arbustifs ». En revanche, au niveau 3 de la typologie, la démarche automatique testée ici sur l'image Worldview-2 ne semble pas encore opérationnelle. De nombreuses formations végétales présentent des signatures spectrales hétérogènes qui s'expliquent par les différents modes de gestion agricole, les durées d'inondation ou encore la nature des sols.

Enfin, il serait intéressant de tester cette méthodologie sur un autre site afin de s'assurer de la reproductibilité de la méthode et de la compléter pour les végétations qui ne sont pas présentes sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay (fourrés nains, prés salé).

4- Bilan comparatif des images

Les images sont comparées les unes aux autres sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay où elles ont toutes été acquises (Tableau 24). Pour les classes n'étant pas présentes sur ce site, nous comparerons les résultats issus de la BDORTHO® IRC et des images SPOT5 sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay (Tableau 25).

4.1- Niveau 1

A ce niveau et quelle que soit l'image, on obtient des classifications très satisfaisantes pour les **végétations naturelles et semi-naturelles** (2 à 7% de sous-détection).

Elles sont satisfaisantes aussi concernant les **milieux non végétalisés** (4 et 9% de sous-détection) et les **végétations artificielles** (22 et 27% de sous-détection), à partir de la BDORTHO® IRC et de l'image Worldview-2. En revanche les résultats issus des images SPOT5 sont médiocres (42% de sous-détection pour les milieux non végétalisés ; 43% de sous-détection pour les végétations artificielles).

4.2- Niveau 2

A ce niveau, on remarque que les taux diminuent pour certaines végétations artificielles.

Sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay, c'est avec l'image Worldview-2 puis avec la BDORTHO® IRC que les **cultures** sont les mieux identifiées. En revanche les résultats issus des images SPOT5 (67% de sous-détection) sont mauvais. Comme nous l'avons expliqué précédemment, les cultures se confondent avec les prairies. Nous avons mis en évidence l'importance de la période d'acquisition de l'image (juillet) pour leur identification. Les résultats concernant la BDORTHO® IRC sont toutefois à pondérer, l'identification des cultures sur le site du

havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay étant médiocres (46% de sous-détection ; 42% de sur-détection).

En ce qui concerne les **plantations**, les résultats sont similaires d'une image à l'autre. Ce sont uniquement les petites plantations de moins de 0,5 hectares qui font baisser le taux d'identification (non inventoriées par l'IFN), les autres étant correctement identifiées.

Les **parcs et jardins** sont bien identifiés à partir des images SPOT5 et de la BDORTHO® IRC avec respectivement 0 et 10% de sous-détection. Ce taux est moins bon à partir de l'image Worldview-2 (33% de sous-détection).

Les **forêts** sont très bien identifiées avec les trois images, mais sont cependant largement surreprésentées à partir des images SPOT5 et de la BDORTHO® IRC, au détriment des fourrés arbustifs. Si maintenant nous nous penchons sur les résultats des **fourrés arbustifs**, ce constat se confirme avec des taux de sous-détection de 96 et 64% à partir des images SPOT5 et de la BDORTHO® IRC. Les résultats obtenus pour les forêts et les fourrés arbustifs à partir de l'image Worldview-2 sont moins contrastés. Ainsi les forêts sont sous-détectées à 25% mais les fourrés sont bien mieux classés qu'avec les deux autres images (40% de sous-détection).

Les **fourrés nains** n'étant pas présents sur tous les sites, nous ne comparons que les résultats issus des images SPOT5 et de la BDORTHO® IRC. Ainsi nous constatons que les résultats issus des images SPOT5 et de la BDORTHO® IRC sont très bons (respectivement 21 et 15% de sous-détection).

Les résultats obtenus pour les **végétations aquatiques marines** (qui correspondent en fait à l'identification des herbiers marins algaux sur placages rocheux), n'ont été validés que sur un site, ce type de végétation n'étant présent que sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay. De plus, ces végétations n'étant visibles qu'à marée basse, leur identification n'a pu être testée à partir de l'image Worldview-2. Nous constatons que ces végétations sont très bien identifiées à partir de la BDORTHO® IRC et moyennement à partir des images SPOT5. La reproductibilité des traitements pour identifier cette classe demanderait à être testé sur un autre site. Nous pensons que des confusions pourraient survenir sur un site ou on trouve et des prés salés, et des herbiers marins algaux en zone intertidale.

Les **végétations herbacées** quelle que soit l'image sont très bien identifiées (4 à 13% de sous-détection).

Même constat pour la classe des **milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies** (0 à 11% de sous-détection).

4.3- Niveau 3

Quelle que soit l'image, les **forêts caducifoliées** mésophiles (38 à 62% de sous-détection) sont difficiles à séparer des forêts hygrophiles (33% de sous-détection). Il serait opportun pour ces classes de rester au niveau supérieur « Forêts caducifoliées ». Les résultats sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay semblent meilleurs pour les taux de sous-détection de ces deux classes (0 à 29% de sous-détection), mais les taux de sur-détection nous montre que les confusions sont trop nombreuses (33 à 54% de sur-détection).

Les **forêts de conifères** sont très bien classées à partir de l'image Worldview-2 avec un taux de sous-détection de 0% et de sur-détection de 13%. Les résultats sont bons avec l'image

	SPOTS		BDORTHO® IRC		Worldview-2	
Kappa	0,63		0,81		0,88	
Niveau 1	SPOT (Sous-détection)	SPOT (Sur-détection)	ORTHO (Sous-détection)	ORTHO (Sur-détection)	Worldview (Sous-détection)	Worldview (Sur-détection)
Milieux non végétalisés	42	12	9	13	4	4
Végétations artificielles	43	38	22	19	27	13
Végétations naturelles et semi-naturelles	4	12	7	4	2	5

	SPOTS		BDORTHO® IRC		Worldview-2	
Kappa	0,64		0,77		0,82	
Niveau 2	SPOT (Sous-détection)	SPOT (Sur-détection)	ORTHO (Sous-détection)	ORTHO (Sur-détection)	Worldview (Sous-détection)	Worldview (Sur-détection)
	42	12	9	13	4	4
Cultures	67	61	24	36	24	6
Plantations	33	0	33	0	30	22
Parc et jardins	0	17	10	10	33	20
Forêts	2	39	12	33	25	17
Fourrés arbustifs	96	50	64	31	40	35
Végétations aquatiques marines	50	0	0	0	/	/
Végétations herbacées	7	22	13	9	4	15
Milieux aquatiques et pelouses amphibies	11	0	11	11	0	10

	SPOTS		BDORTHO® IRC		Worldview-2	
Kappa	0,60		0,71		0,73	
Niveau 3	SPOT (Sous-détection)	SPOT (Sur-détection)	ORTHO (Sous-détection)	ORTHO (Sur-détection)	Worldview (Sous-détection)	Worldview (Sur-détection)
	42	12	9	13	4	4
	67	61	24	36	24	6
	33	0	33	0	30	22
	0	17	10	10	33	20
Forêts mésophiles (caducifoliées)	38	70	46	56	62	17
Forêts hygrophiles (caducifoliées)	33	75	33	40	33	50
Forêts de conifères	14	14	14	33	0	13
Forêts de sclérophylles	45	0	9	41	36	30
Fourrés mésophiles	95	50	75	29	35	28
Fourrés hygrophiles	100	100	80	83	60	60
Herbiers marins	50	0	0	0	/	/
Prairies mésophiles	52	62	68	36	43	48
Prairies hygrophiles	0	38	0	28	39	30
Pelouses sur sable non fixé	6	0	12	7	6	0
Pelouses sur sable fixé	0	4	5	12	5	5
Roselières et cariçaies	100	100	100	100	66	94
	11	0	11	11	0	10

Tableau 24 : Bilan des résultats obtenus par image, par niveau et par végétation sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay : les chiffres correspondent aux taux d’identification, les couleurs, aux pourcentages d’identification (Vert : 0-30% ; Orange : 31-50% ; Rouge : 51-100%)

	SPOT5		BDORTHO® IRC	
Kappa	0,71		0,75	
Niveau 1	SPOT (Sous-détection)	SPOT (Sur-détection)	ORTHO (Sous-détection)	ORTHO (Sur-détection)
Milieux non végétalisés	30	21	5	12
Végétations artificielles	41	20	38	34
Végétations naturelles et semi-naturelles	3	9	7	6

	SPOT5		BDORTHO® IRC	
Kappa	0,72		0,75	
Niveau 2	SPOT (Sous-détection)	SPOT (Sur-détection)	ORTHO (Sous-détection)	ORTHO (Sur-détection)
	30	21	5	12
Cultures	52	28	46	42
Plantations	20	0	20	0
Parc et jardins	8	8	17	17
Forêts	3	37	0	34
Fourrés arbustifs	92	50	80	33
Fourrés nains	21	3	15	21
Végétations herbacées	6	21	22	15
Milieux aquatiques et pelouses amphibies	5	0	3	0

	SPOT5		BDORTHO® IRC	
Kappa	0,57		0,65	
Niveau 3	SPOT (Sous-détection)	SPOT (Sur-détection)	ORTHO (Sous-détection)	ORTHO (Sur-détection)
	30	21	5	12
	52	28	46	42
	20	0	20	0
	8	8	17	17
Forêts mésophiles (caducifoliées)	29	6	21	49
Forêts hygrophiles (caducifoliées)	27	33	0	54
Forêts de conifères	0	39	4	19
Fourrés mésophiles	100	100	77	37
Fourrés hygrophiles	100	100	100	100
Landes et garrigues	76	18	63	26
Tourbières à chaméphytes	40	87	20	83
Fourrés crassulescents	/	/	22	50
Prairies mésophiles	57	69	82	70
Prairies hygrophiles	36	56	32	47
Pelouses sur sable non fixé	17	69	100	100
Pelouses sur sable fixé	13	8	3	9
Roselières et cariçaies	100	100	58	54
Franges et lisières	100	100	100	100
Végétations des prés salés	6	35	19	11
	5	0	3	0

Tableau 25 : Bilan des résultats obtenus par image (SPOT5, BDORTHO® IRC), par niveau et par végétation sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay : les chiffres correspondent aux moyennes des taux d’identification, les couleurs, aux moyennes des pourcentages d’identification (Vert : 0-30% ; Orange : 31-50% ; Rouge : 51-100%)

SPOT5 et la BDORTHO® IRC avec des taux de sous-détection de 14% et de sur-détection de 14 et 33%.

Les **forêts de sclérophylles** sont moyennement classées à partir des trois images. Pour les images SPOT5 et Worldview-2 se sont les taux de sous-détection qui sont médiocres (36 et 45% de sous-détection) et à partir de la BDORTHO IRC c'est le taux de sur-détection (41% de sur-détection).

Les résultats concernant l'identification des **fourrés** ne sont pas concluants. Ils sont meilleurs à partir de l'image Worldview-2, mais le taux d'identification n'est cependant pas suffisamment élevé pour être acceptable (35 à 60% de sous-détection).

Les **landes et garrigues** ainsi que les **tourbières à chaméphytes** n'étant pas présentes sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay, nous n'avons pu tester leur identification à partir de l'image Worldview-2. Les résultats issus des traitements de la BDORTHO® IRC et des images SPOT5 sont insatisfaisants. Les confusions entre ces deux classes sont trop importantes.

Les **fourrés crassulescents** n'étant présents que sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay, il est difficile de conclure sur ces résultats dont la reproductibilité n'a pu être vérifiée. Malgré un taux de sous-détection de 22% à partir de la BDORTHO® IRC, nous avons un taux de sur-détection de 50%.

Les **herbiers marins** sont très bien identifiés quelle que soit l'image (non présents sur le site des dunes de la Sauzaie). Les mauvais résultats à partir des images SPOT5 sont dus aux points de validation qui n'ont pas été pris sur une surface suffisamment étendue.

Les **prairies mésophiles** sont très mal identifiées quelle que soit l'image. Les résultats issues de l'image Worldview-2 sont légèrement meilleurs, mais ne sont cependant pas suffisamment élevés pour être acceptables.

Les **prairies hygrophiles** sont très bien identifiées à partir de la BDORTHO® IRC et des images SPOT5 avec cependant des taux de sur-détection respectivement de 28 et 38%. En revanche les résultats sont plus mitigés pour l'image Worldview-2 avec un taux de sous-détection de 39%.

Les **pelouses sur sable fixé et sur sable non fixé** sont très bons quelle que soit l'image. Les mauvais résultats observés à partir de la BDORTHO® IRC sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay pour les pelouses sur sable non fixé, sont dus aux points de validation dont la date d'acquisition sur le terrain était trop éloignée de la date de prise de vue des images aérienne (végétation ayant fortement évoluée).

Les résultats pour les **roselières et cariçaies** et les **franges et lisières** étant quasiment nuls quelle que soit l'image, nous pouvons considérer que nous sommes incapables de distinguer ces végétations.

Les **prés salés** n'étant pas présents sur le site des dunes de la Sauzaie, nous n'avons pu tester l'identification de ces végétations à partir de l'image Worldview-2. Les résultats que nous obtenons à partir de la BDORTHO® IRC sont tout a fait concluant (19% de sous-détection). En revanche les résultats sont plus mitigés à partir de l'image SPOT5. Le taux de 6% de sous-détection est à pondérer, le taux de sur-détection (35%) nous indiquant de nombreuses confusions avec d'autres végétations.

Pour conclure, si nous ne cherchons à identifier les classes au niveau 1, nous pouvons utiliser l'une des trois images. Mais les taux globaux de réussite sont cependant meilleurs à partir de la BDORTHO® IRC et l'image Worldview-2. La délimitation des objets est aussi plus précise à partir de ces deux images, ce qui s'explique par leur résolution centimétrique.

Au niveau 2, c'est avec l'image Worldview-2 que les résultats sont les plus concluants. Ce constat est toutefois à pondérer, car toutes les classes n'étaient pas présentes sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay. Le coefficient kappa au niveau 2 à partir de la BDORTHO® IRC est très bon mais il masque une très grande variabilité de résultats entre classes. Nous faisons le même constat à partir des images SPOT5, pour lesquelles le coefficient kappa est acceptable, mais il masque la variabilité entre classes.

Au niveau 3, quelle que soit l'image, les résultats nous montrent trop de confusions entre les végétations. Des solutions sont cependant envisageables pour améliorer ces résultats au niveau 2 et 3. Elles sont développées en perspectives (partie 4.2).

PARTIE 4 :

Bilan et perspectives

Dans cette dernière partie seront présentés les coûts estimés par type d'image pour une cartographie au niveau 3, qui correspond au niveau le plus détaillé de caractérisation de la végétation que nous permettent les images, établir un bilan comparatif de ces coûts et enfin présenter les perspectives possibles de cette étude.

Les tableaux suivants font état du coût imputé à chaque image pour un site de 100 km² en se basant sur les tarifs des images, des données auxiliaires, du terrain et le coût salarial (coût en interne estimé par le CBN de Brest). Le prix des logiciels n'est pas intégré dans les tableaux puisqu'il est variable suivant la licence.

La durée des traitements est évaluée pour une personne qualifiée en possession de toutes les données nécessaires et qui ne rencontre pas de problèmes techniques.

1- Estimation des coûts

1.1- BDORTHO® IRC

Les prix pour la BDORTHO® IRC ont été calculés pour une surface de 100km², même si ces données sont toujours acquises à l'échelle départementale (soit 1800€ pour un département en tarif de base, et 480€ pour trois départements en licence recherche/enseignement).

On évalue à une journée de travail le temps à consacrer aux prétraitements qui consistent en la réalisation de la mosaïque de dalles. La phase de classification inclut une éventuelle adaptation des procédures de classification et le temps de classification. Ce temps est cependant très variable suivant la licence du logiciel utilisé. Pour une surface supérieure à 80 km², les traitements ne sont plus possibles avec une simple licence developper. Le temps consacré ici à l'élaboration de la démarche de classification n'est pas pris en compte dans nos calculs de coût.

Les temps à consacrer aux étapes suivantes seront sensiblement les mêmes quelque soit l'image traitée. C'est-à-dire une journée pour évaluer la qualité de la classification, quatre jours pour réaliser des observations sur le terrain et sélectionner des points de validation, et environ quatre jours pour préparer l'ensemble des données vectorielles et matricielles nécessaires aux traitements.

Au total, la démarche appliquée de cartographie de la végétation naturelle et semi-naturelle à partir de la BDORTHO® IRC sur un site de 100 km² nécessite au minimum 16 jours de travail pour une personne qualifiée (Tableau 26). Dans le cadre d'une mission réalisée par un bureau d'étude, qui ne bénéficie donc pas des tarifs accordés aux chercheurs, le coût total du traitement d'un site de 100km² est estimé à 5 485€. Dans le cadre d'une mission de recherche, le coût sera d'environ 5 458€.

Données/Opérateur	Coûts (surface de 100 km ²)		Taches	Durée (en jours)
BDORTHO® IRC	Base : 30€	Recherche : 2,70€	Prétraitements	1
			Classification	6,0
			Evaluation de la qualité de la classification	1,0

Contrôle terrain	300€ (frais de mission)		Observations	3,0
			Sélection des points de validation	1
Zones à dominante humide	gratuite		Calcul de l'indice topographique	1
			Affinement par photo-interprétation	1
Bd Scan-Géol-50 (BRGM)	35€		Numérisation des contours des sables dunaires	0,5
BDTOPO® (IGN)	gratuite		Préparation des données	0,75
Plantations (IGN-IFN)	gratuite		Préparation des données	0,25
Image de texture	gratuite		Calcul de l'image de texture	0,5
Salarié (320€/jour)	320€ x 16jours = 5 120€		Total (nombre de jours)	16
TOTAL	Base : 5 485€	Recherche : 5 458€		

Tableau 26 : Coûts et temps de traitement des données nécessaires aux traitements à partir de la BDORTHO®
IRC

1.2- SPOT5

Les prix pour les images SPOT5 ont été calculés pour une surface de 100km² même si ces données sont toujours acquises selon des dalles de 60km².

Pour cette image, on évalue à une journée de travail le temps à consacrer aux prétraitements. Le temps pour mettre en œuvre la classification est évalué à 3 jours. Les temps à consacrer aux autres étapes seront sensiblement identiques pour les trois images.

Au total, la démarche appliquée de cartographie de la végétation naturelle et semi-naturelle à partir de l'image SPOT5 sur un site de 100 km² nécessiterait au minimum 13 jours de travail pour une personne qualifiée (Tableau 27). Dans le cadre d'une mission réalisée par un bureau d'étude, qui ne bénéficie donc pas des tarifs accordés aux chercheurs, le traitement d'un site de 100km² a un coût total d'environ 8 995€ pour des images d'archives, et 10 495€ pour des images acquises en programmation. Dans le cadre d'une mission de recherche, le coût sera d'environ 4 928€ pour des images d'archives, et 5 128€ pour des images acquises en programmation.

Données/Opérateur	Coûts (surface de 100 km²)		Taches	Durée (en jours)
SPOT5	Base : 4 500€ (archive) 6 000€ (programmation)	Recherche : 433€ (archive) 633€ (programmation)	Prétraitements	1
			Classification	3,0
			Evaluation de la qualité de la classification	1,0
Contrôle terrain	300€ (frais de mission)		Observations	3,0
			Sélection des points de validation	1
Zones à dominante humide	gratuite		Calcul de l'indice topographique	1
			Affinement par photo-interprétation	1
Bd Scan-Géol-50 (BRGM)	35€		Numérisation des contours des sables dunaires	0,5
BDTOPO® (IGN)	gratuite		Préparation des données	0,75
Formations ligneuses (Plantations, fourrés nains, haies, forêts) (IGN-IFN)	gratuite		Préparation des données	0,75
Salarié (320€/jour)	320€ x 13jours = 4 160€		Total (nombre de jours)	13
TOTAL	Base : 8 995€ (archive) 10 495€ (programmation)	Recherche : 4 928€ (archive) 5 128€ (programmation)		

Tableau 27 : Coûts et temps de traitement des données nécessaires aux traitements d'une image SPOT5

1.3- Worldview-2

Pour cette image, on évalue à une journée et demie de travail le temps à consacrer aux prétraitements. La phase de classification inclut une éventuelle adaptation des procédures de classification, la prise d'échantillons d'entraînement pour la classification pixel et le temps de classification. Les corrections liées à la mise à jour de la BD PARCELLAIRE® par photo-interprétation de l'image Worldview-2 ont nécessité environ une demi-journée de travail sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay. Ces corrections sont importantes dans le sens où elles permettent d'éviter des erreurs de classification par la suite. Dans le cadre de cette démarche expérimentale, la mise à jour du parcellaire a été effectuée par approche automatique orientée-objet à partir de l'image Worldview-2. Mais cette démarche expérimentale reste à valider sur d'autres sites et éventuellement d'autres sources d'informations (BD ORTHO® IRC). Les temps à consacrer aux étapes suivantes, restent identiques à ce que nous avons déjà décrit pour les autres images.

Au total, la démarche appliquée de cartographie de la végétation naturelle et semi-naturelle à partir de l'image Worldview-2 sur un site de 100 km², nécessiterait au minimum 15 jours de travail pour une personne qualifiée (Tableau 28) (Annexe 10). Le coût total pour traiter une image Worldview-2 de 100km² est d'environ 7 735€ pour une image d'archive, et 8 335€ pour une image acquise en programmation.

Données/Opérateur	Coûts (surface de 100 km ²)	Taches	Durée (en jours)
Worldview-2	2 600€ (archive) 3 200€ (programmation)	Prétraitements	1,5
		Classification	4,0
		Evaluation de la qualité de la classification	1,0
Contrôle terrain	300€ (frais de mission)	Observations	3,0
		Sélection des points de validation	1
BD PARCELLAIRE® (IGN)	gratuite	Corrections	0,5
Zones à dominante humide	gratuite	Calcul de l'indice topographique	1
		Affinement par photo-interprétation	1
Bd Scan-Géol-50 (BRGM)	35€	Numérisation des contours des sables dunaires	0,5
BD TOPO® (IGN)	gratuite	Préparation des données	0,75
Plantations (IGN-IFN)	gratuite	Préparation des données	0,25
Image de texture	gratuite	Calcul de l'image de texture	0,5
Salarié (320€/jour)	320€ x 15 jours = 4 800€	Total (nombre de jours)	15
TOTAL	7 735€ (archive) 8 335€ (programmation)		

Tableau 28 : Coûts et temps de traitement des données nécessaires aux traitements d'une image Worldview-2

1.4- Bilan comparatif

Des trois images, ce sont les traitements à partir de la BD ORTHO® IRC qui sont les plus compétitifs d'un point de vue financier. Pour un utilisateur ne faisant pas partie d'un organisme de recherche, les traitements à partir de l'image Worldview-2 seront moins coûteux que ceux issus d'images SPOT5. En revanche, si c'est un organisme de recherche qui produit les classifications, les

coûts des traitements à partir des images SPOT5 sont quasiment équivalents à ceux issus de la BDORTHO® IRC (Tableau 29).

Tarif	SPOT5	BDORTHO® IRC	Worldview-2
Base (archive)	8 995€	5 485€	7 735€
Base (programmation)	10 495€		8 335€
Recherche (archive)	4 928€	5 458€	7 735€
Recherche (programmation)	5 128€		8 335€

Tableau 29 : Récapitulatif des tarifs pour les trois types d'images pour une superficie de 100km² et au niveau « Type de formation végétale ».

Pour faire le parallèle, une cartographie réalisée sur le terrain sur un territoire de 100 km² au niveau de l'association végétale, nécessite environ 375 jours de travail, ce qui correspond à un coût de 120 000 euros. Evidemment, le niveau de finesse cartographique de ces travaux de terrain est sans équivalent avec ceux d'un traitement automatique d'images.

2- Bilan de la méthode et perspectives

A plusieurs reprises ont été montrées les limites des procédures de classification pour certaines classes typologiques. Sont établis ci-dessous un bilan, et une série de propositions possibles, visant à améliorer les classifications pour les trois types d'images.

2.1- Acquisition de données auxiliaires

La mobilisation de données auxiliaires est très importante pour construire des classifications fiables et reproductibles, à des niveaux typologiques assez fins tels que le niveau « Types de formation végétale ».

Les images de texture ont prouvé leur utilité dans l'extraction des strates ligneuses (Bock *et al.* 2005 ; Mallinis 2008 ; Kamagata 2008) pour les images dont la qualité spatiale est suffisante : Worldview-2 et BDORTHO® IRC. L'image de dissimilarité a par ailleurs aidé à discriminer des zones de bâti supplémentaire à partir de l'image Worldview-2, qui n'avaient pas été identifiées par l'IGN.

Pour les trois images traitées, les données vectorielles issues de la BDTPO®, la Bd Scan-Géol-50 et la BDPARCELLAIRE® ont permis d'améliorer significativement la qualité de la classification (Lucas *et al.* 2007 ; Förster et Kleinschmit 2008 ; Rapinel et Hubert-Moy 2012) par l'apport d'information contextuelle. Elles permettent entre autre de distinguer des végétations qui possèdent des qualités spectrales similaires comme les différents types de prairies (Bock *et al.* 2005). Il faut toutefois noter que la précision des données auxiliaires disponibles n'est pas toujours en adéquation avec la précision des images. Ainsi les données géologiques (1/50 000) ont été retravaillées, ce qui prend un certain temps mais qui est toutefois indispensable, car ces informations améliorent les classifications. Des données géologiques plus fines, auraient pu permettre de procéder comme Bock *et al.* (2005), et utiliser la géologie pour distinguer les pelouses calcaires des autres types de pelouses.

Une autre donnée auxiliaire indispensable mais indisponible avec une précision compatible avec nos images, est l'information pédologique (Bock *et al.* 2005).

La couche vectorielle des zones à dominante humide a prouvé son efficacité dans cette étude puisqu'elle permet d'identifier avec de bons résultats les végétations hygrophiles lorsque

celles-ci s'expriment sur des surfaces suffisamment importantes. En revanche sa précision (1/50 000) rend difficile son exploitation pour identifier les formations végétales de superficie souvent plus faibles comme les tourbières et certaines forêts marécageuses et alluviales qui sont souvent surestimées au détriment d'autres végétations. Il serait intéressant de disposer d'une couche vectorielle au 1/25 000, ce qui permettrait d'identifier avec une plus grande certitude les végétations hygrophiles du niveau 3.

Il faut noter que dans certains départements, la BDPARCELLAIRE® a été retravaillée, d'une part pour mettre à jour le découpage parcellaire (Vendée) et d'autre part pour créer une couche vectorielle du parcellaire pour certaines communes (Finistère). Si ce travail de correction peut demander un investissement important en temps de traitement (0,5 à 2 jours de traitements), il améliore néanmoins la qualité de la classification automatique en particulier pour les cultures, les prairies et les jardins (Annexe 10).

Les variations de climat au niveau régional et local influencent la phénologie des végétations (Lucas *et al.* 2011). Alors que dans la Manche et le Finistère le climat est doux et humide toute l'année, celui des autres départements présente des saisons plus marquées avec des étés plus chauds et des hivers plus froids, ce qui influence la végétation. Elles sont aussi influencées par la géologie, le sol, l'altitude et la présence de la mer. Pour intégrer ces différentes influences aux procédures de classification, Lucas *et al.* (2011) ont divisé le Pays de Galles en 15 territoires biogéographiques caractérisés par des variables environnementales, topographiques et la distribution des habitats. Sur le territoire d'agrément du CBN de Brest il existe la base de données géographiques sur la répartition des végétations au 1/1 000 000 (BDGveg_FR) (Leguédou *et al.* 2011). Dans l'optique de la réalisation d'une cartographie sur un vaste territoire, il serait intéressant de prendre exemple sur le travail du Pays de Galles et utiliser les informations de cette base de données comme donnée auxiliaire supplémentaire.

2.2- Acquisition d'autres images

2.2.1- Images multi-dates

Nous avons acquis pour cette étude une image à une seule date pour chaque site. Lucas *et al.* (2011) ont montré l'intérêt de disposer de plusieurs images acquises durant le printemps et l'été (de mars à juillet) pour discriminer un maximum de végétations. Ainsi, la discrimination des cultures et des prairies dans le cadre de cette étude a posé de gros problèmes ; ces végétations ayant des réponses spectrales très similaires suivant la date à laquelle l'image a été acquise (Corgne *et al.* 2009). D'après les résultats, les cultures sont beaucoup mieux identifiées en juillet. De plus, il apparaît qu'en disposant d'images acquises en mars nous aurions pu identifier les sols nus et ainsi obtenir de meilleurs résultats pour la classification de ces végétations. De même, au sein des prairies, nous avons été dans l'incapacité de distinguer les prairies permanentes des prairies temporaires, alors que pour un gestionnaire il y a un enjeu fort à mettre en évidence les prairies permanentes. Une prairie étant considérée comme temporaire lorsqu'elle a été retournée au moins une fois sur une période de 7 ans, il serait donc intéressant d'acquérir une série temporelle d'images (Lecerf 2008). Enfin, des images multi-dates sont indispensables à la caractérisation des landes et des roselières et cariçaies. Ces végétations possèdent une réflectance et une texture particulière plus marquée pendant la période hivernale.

2.2.2- Autres capteurs

Des données altimétriques fines de type LiDAR pourraient également constituer une aide utile pour une meilleure discrimination de certaines végétations. Concernant les végétations des prés salés, nous n'avons pas réussi à les discriminer finement. Or Tuxen *et al.* (2008) en associant le LiDAR aux images aériennes, obtiennent de très bons résultats dans la discrimination des différentes végétations de ces milieux en s'attachant à cartographier les espèces dominantes. Les données altimétriques de type LIDAR seraient aussi appropriées pour distinguer les forêts des fourrés arbustifs (Genç *et al.* 2004), puisque ces végétations se discriminent à partir d'un critère de hauteur de la végétation (+/- 7 mètres). Enfin le LIDAR trouverait aussi son application pour l'identification des milieux aquatiques en identifiant avec précision les surfaces en eau et le réseau hydrographique, aussi bien dans les milieux ouverts que fermés (Annexe 10). Il faut néanmoins remarquer que ce type de démarche représente un coût non négligeable, et serait donc plutôt à privilégier sur des petits sites à enjeux.

Pour caractériser les landes à des niveaux plus fins de la typologie, les images hyperspectrales donneraient de très bons résultats (Haest *et al.* 2011).

Les roselières et cariçaies sont des végétations très peu visibles en été, par contre elles le sont beaucoup plus en hiver car elles forment du chaume sur le sol qui présente une réflectance particulière. Pour ces végétations il serait donc intéressant d'acquérir des images en hiver. Les images Quickbird semblent pouvoir donner de bons résultats pour identifier ces végétations (Rapinel 2012).

2.3- Photo-interprétation

Dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas réalisé de photo-interprétation. Les résultats présentés sont donc obtenus par des procédures entièrement automatisées. Les seules étapes où la photo-interprétation intervient, sont celles de la création des données vectorielles (sables dunaires, zones à dominante humide, parcellaires, fourrés nains, plantations) et de la prise d'échantillons pour la mise en œuvre de la méthode pixel. Au vu des résultats, de nombreuses erreurs pourraient être supprimées en post traitements si on ajoutait une étape de photo-interprétation, ce qui améliorerait la qualité de la cartographie finale (Eisfelder *et al.* 2009), particulièrement pour l'image SPOT5 (Schwarzer *et al.* 2009).

Par exemple, la discrimination des landes, difficiles à caractériser, pourrait être améliorée en réalisant une étape de photo-interprétation. Ces végétations ont en effet tendance à se confondre avec certaines cultures en début de développement. Elles sont aussi souvent classées en forêts de conifère lorsqu'elles sont piquetées de pins, même si la surface en lande est majoritaire par rapport aux pins.

De même, les ombres sur les images aériennes ont été un frein à la classification des forêts. L'information spectrale que l'on peut extraire des objets « ombre » est limitée (Bock *et al.* 2005). Elles présentent des réponses spectrales similaires à celles des forêts sempervirentes. Les ombres dans les forêts caducifoliées ont donc un effet très négatif sur leur classification (Eisfelder *et al.* 2009) puisqu'elles ont tendance à être classées en forêts sempervirentes. Deux possibilités sont envisageables pour attribuer ces objets parasites à la végétation sous-jacente : un travail manuel de réaffectation par photo-interprétation (Bock *et al.* 2005), ou les fusionner avec l'objet voisin avec lequel elle partage la plus grande longueur de contact (Rapinel et Hubert-Moy 2012). Cette seconde

solution a l'avantage d'être rapide à mettre en œuvre mais a tendance à surestimer les forêts au détriment des végétations voisines.

Enfin, la photo-interprétation serait très utile à partir de la BDORTHO® IRC, pour distinguer les cultures des prairies. Dans certaines parcelles, on peut souvent identifier des traces d'activité qui permettent ainsi de les qualifier.

2.4- Ajustements de la typologie emboîtée des végétations

Globalement, la typologie emboîtée des végétations est adaptée à une cartographie par télédétection. Cependant, quelques ajustements seraient nécessaires pour que son utilisation soit entièrement compatible avec des traitements automatiques. Ces ajustements concernent :

- Les classes « Forêts » et « Fourrés arbustifs » : leur distinction selon la hauteur de la végétation est peu adaptée à une identification par méthodes de traitements automatiques.
- Les classes « Végétations aquatiques » et « Pelouses amphibies » : ces végétations se retrouvent souvent en mosaïque sur le terrain et il est par conséquent impossible de les dissocier par traitement automatique.
- Les classes « Prés salés » et « Fourrés crassulés » : suivant les images, on n'est pas capable de dissocier ces végétations, il serait donc intéressant de disposer d'une classe à un niveau supérieur qui les regroupe.
- Les classes « Prairies permanentes » et « Prairies temporaires » : d'un point de vue floristique ce sont des végétations totalement différentes mais en traitement d'image, elles présentent les mêmes réponses spectrales et texturales.

2.5- Récapitulatif des principales recommandations

Plusieurs solutions sont possibles pour améliorer les résultats des classifications Tableau 30, mais certaines d'entre elles demandent un niveau de technicité et un coût non négligeable. Les différentes mesures qui seraient à mettre en place et qui paraissent envisageables pour répondre à l'objectif d'une carte semi-automatique des végétations au 1/25 000 à l'échelle de vastes territoires peuvent être résumées ainsi :

- L'acquisition d'images multi-dates,
- l'ajustement de certaines classes de la typologie afin de les rendre compatibles avec une démarche de traitement automatique,
- la photo-interprétation en post-traitement ce qui permettrait de supprimer un grand nombre d'erreurs et améliorer significativement les résultats,
- l'utilisation de données vectorielles de résolution compatible avec nos objectifs. Nous insistons particulièrement sur les données concernant la localisation des zones humides qui ne sont actuellement disponibles qu'au 1/50 000 et qui seraient à produire au 1/25 000,
- l'utilisation de données altimétriques de type LiDAR.

Classes		Traitement automatique d'images : facteurs limitants	Recommandations		Technicité/Coût
Cultures	Prairies temporaires	Confusion entre les cultures, les prairies temporaires et les prairies permanentes	Multi-dates (une image en hiver et une image en été sur 7 ans)	Programme de recherche en cours au laboratoire COSTEL (UMR6554 LETG) sur l'identification annuelle des prairies de longue durée à partir d'images multi-date.	++
Plantations		Les petites plantations de moins de 0,5 hectares ne sont pas prises en compte	Adapter la résolution de la couche SIG « Plantations » au 1/25 000		+
Forêts		Confusion entre les forêts et les fourrés	LiDAR ou ajustement de la typologie (forêts+fourrés arbustifs)		+++ ou +
Forêts mésophiles (caducifoliées)		Confusion entre les forêts mésophiles et les forêts hygrophiles	Adapter la couche SIG « Zones à dominante humide » au 1/25 000		++
Forêts hygrophiles (caducifoliées)		Confusion entre les forêts mésophiles et les forêts hygrophiles	Adapter la couche SIG « Zones à dominante humide » au 1/25 000		++
Forêts de conifères		Confusion entre les forêts de conifères et les forêts de sclérophylles	Adapter la couche SIG « Sables dunaire » au 1/25 000		+
Forêts de sclérophylles		Confusion entre les forêts de conifères et les forêts de sclérophylles	Adapter la couche SIG « Sables dunaire » au 1/25 000		+
Forêts mixtes		Difficulté à mettre une limite entre les forêts mixtes et les forêts caducifoliées et sempervirentes	/		/
Fourrés arbustifs		Confusion entre les forêts et les fourrés	LiDAR ou ajustement de la typologie (forêts+fourrés arbustifs)		+++ ou +
Fourrés mésophiles		Confusion entre les fourrés mésophiles et les fourrés hygrophiles	Adapter la couche SIG « Zones à dominante humide » au 1/25 000		++
Fourrés hygrophiles		Confusion entre les fourrés mésophiles et les fourrés hygrophiles	Adapter la couche SIG « Zones à dominante humide » au 1/25 000		++
Fourrés nains		Confusion entre certains types de fourrés nains (landes et garrigues et tourbières à chaméphytes) et les cultures en début de germination	Multi-dates (une image en hiver)		+
Landes et garrigues		Confusion entre les landes et garrigues et les tourbières à chaméphytes	Adapter la couche SIG « Zones à dominante humide » au 1/25 000		++
Tourbières à chaméphytes		Confusion entre les	Adapter la couche SIG « Zones à		++

		landes et garrigues et les tourbières à chaméphytes	dominante humide » au 1/25 000			
Fourrés crassulescents		Confusion entre les fourrés crassulescents et les prés salés	Multi-date (une image en hiver) ou ajustement de la typologie (fourrés crassulescents+prés salés)		+ ou +	
Prairies et pelouses		Confusion entre les prairies et pelouses et les Cultures/Prairies temporaires	Multi-date (une image en hiver et une image en été) Programme de recherche en cours au laboratoire COSTEL (UMR6554 LETG) sur l'identification annuelle des prairies de longue durée à partir d'images multi-date.		+	
Prairies mésophiles		Confusion entre les prairies mésophiles et les prairies hygrophiles	Adapter la couche SIG « Zones à dominante humide » au 1/25 000		++	
Prairies hygrophiles		Confusion entre les prairies mésophiles et les prairies hygrophiles	Adapter la couche SIG « Zones à dominante humide » au 1/25 000		++	
Roselières et cariçaies		Confusion entre les roselières et cariçaies et les autres types de végétations	Multi-dates (une image en hiver)		+	
Franges et lisières		Impossible à distinguer du reste des végétations	/		/	
Prés salés		Confusion entre les fourrés crassulescents et les prés salés	Multi-dates (une image en hiver) ou ajustement de la typologie (fourrés crassulescents+prés salés) ou LiDAR		+ ou + ou +++	
Milieux aquatiques	Végétations aquatiques et prairies et pelouses amphibies	Difficulté à distinguer l'enveloppe des surfaces en eau et les végétations aquatiques et prairies et pelouses amphibies du reste des végétations.	LiDAR ou RADAR ou Multi-date (une image en hiver)	Multi-dates (une image en hiver) ou Photo-interprétation	+++ ou +++ ou +	+ ou +
Ombres		Confusion entre les ombres et les forêts	Multi-dates (une image en hiver)		+	

Tableau 30 : Facteurs limitant et recommandations pour l'amélioration de l'identification des différentes classes de végétation (+ : coût et technicité peu élevés ; +++ : coût et technicité élevés)

CONCLUSION

Aux niveaux national et régional, des lacunes importantes de connaissance sont constatées en ce qui concerne la diversité, la fréquence, la répartition, et l'état de conservation des habitats naturels et semi-naturels, ainsi que les pressions qu'ils subissent. C'est dans l'objectif de combler ces lacunes au niveau des régions Bretagne, Basse-Normandie et Pays de la Loire, que le « pôle habitat » du CBN de Brest a été créé et que cette étude a été engagée.

Son objectif était d'évaluer les potentialités qu'offrent les images aériennes et satellitaires pour la cartographie des grands types de végétations à une échelle du 1/25 000. Ce programme de recherche appliquée, débuté en janvier 2010, a fait l'objet d'une convention entre le Conservatoire Botanique de Brest et l'UMR 6554 LETG CNRS.

La réalisation d'un premier état de l'art a permis de statuer sur les images qui paraissaient intéressantes à acquérir pour réaliser cette étude : des images satellitaires SPOT5 et Worldview-2 et des ortho-images issues de la BDORTHO® IRC. Elles ont été choisies en fonction de leur coût, leur résolution spatiale et de l'aspect novateur que leur traitement présentait. Des données auxiliaires additionnelles de type vectoriel (sables dunaires, zones à dominante humide, parcellaire, bâti, routes, surfaces en eau, zone intertidale, forêts, haies, fourrés nains, plantations) et/ou matriciel (image de texture dérivée de l'image Worldview-2 et de la BDORTHO® IRC) ont été utilisées.

La typologie de référence pour ce projet est au départ la typologie emboîtée des végétations réalisée par le CBN de Brest en 2011. Celle-ci permet en effet d'articuler, la typologie phytosociologique utilisée sur le terrain, avec une typologie physionomique (structurale) compatible avec des traitements d'image. Suite aux premiers traitements et aux validations de terrain, il s'est avéré que la typologie proposée par le CBN comprenait de nombreuses végétations (souvent aux niveaux inférieurs à celui de la classe phytosociologique) qui ne pouvaient pas être identifiées par analyse d'images. Aux niveaux supérieurs de la classification, quelques adaptations ont dû être proposées pour augmenter la fiabilité des analyses.

Les potentialités des trois images acquises ont été évaluées sur quatre sites, qui ont été choisis en fonction de leur représentativité géographique, de leur représentativité en types de végétations et de la disponibilité de données de terrain récentes. Ces sites sont :

- Le complexe du Menez-Hom (Finistère),
- les marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie (Manche),
- les dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay (Vendée),
- le havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay (Manche).

Les trois premiers sites ont permis d'élaborer et de tester les procédures de classification à partir des trois types d'images, le quatrième ayant servi à la validation de la reproductibilité des procédures de traitement de la BDORTHO® IRC et des images SPOT5.

Ce travail, après de nombreux tests de classification et de révision des procédures, a permis d'aboutir pour chaque image à une chaîne de traitement reproductible permettant d'identifier un certain nombre de classes de la typologie, à des niveaux plus ou moins fins selon les types de végétation. Les procédures développées à partir des images SPOT5 et de la BDORTHO® IRC utilisent exclusivement l'approche orientée-objet. Cette technique de classification vise à segmenter une image en objets en fusionnant les pixels adjacents, puis classer ces objets suivant des critères de forme, de texture, de couleur et de contexte. Contrairement aux images SPOT5 et la BDORTHO®

IRC, la procédure établie à partir de l'image Worldview-2 (démarche plus exploratoire) utilise conjointement l'approche orientée-objet et la méthode pixel (algorithme Maximum Likelihood). Cet algorithme nécessite l'acquisition d'échantillons d'apprentissage et attribue ensuite les pixels aux classes avec lesquels ils ont le plus de similitudes.

Les résultats des classifications automatiques ont dans un premier temps été confrontés aux cartes phytosociologiques réalisées sur le terrain, mais il s'est avéré dans presque tous les cas, que les cartes présentaient de grandes divergences. Des relevés sur le terrain ont donc été effectués afin de valider nos classifications. Des matrices de confusions, qui comparent les objets obtenus par classification automatique avec les points de référence relevés sur le terrain, ont été réalisées aux trois niveaux de la typologie (occupation du sol, grands types de végétations et types de formations végétales), pour les trois types d'images et sur les quatre sites. Chaque matrice de confusion est accompagnée d'un coefficient kappa qui permet une évaluation globale de la classification.

La comparaison des coefficients kappa sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay (seul site où toutes les images ont pu être testées) aux trois niveaux et pour les trois images montre que c'est avec l'image Worldview-2 que les résultats sont les plus concluants, puis avec la BDORTHO® IRC et enfin avec les images SPOT5 (Tableau 31). La délimitation des objets est aussi plus précise à partir de l'image Worldview-2 et de la BDORTHO® IRC, ce qui s'explique par leur résolution centimétrique. Le nombre de bandes spectrales et la résolution spatiale des images influencent la qualité du résultat. Les meilleurs résultats que l'on obtient sont à partir de l'image Worldview-2 qui possède un nombre de bandes supérieur aux deux autres images et une très bonne résolution spatiale (similaire à la BDORTHO® IRC). Le couplage de ces deux facteurs est donc très important pour la qualité finale du résultat. Il faut toutefois noter que l'utilisation de l'image Worldview-2 nécessite un niveau de technicité un peu plus élevé ; la démarche étant plus complexe à mettre en œuvre.

	SPOT	BDORTHO IRC	Worldview-2
Niveau 1 : Occupation du sol	0,63	0,81	0,88
Niveau 2 : Grands types de végétations	0,64	0,77	0,82
Niveau 3 : Types de formations végétales	0,60	0,71	0,73

Tableau 31 : Coefficients kappa pour les trois niveaux pour les trois images sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay

Les résultats obtenus sont variables d'une image à l'autre. Au niveau 1 (Occupation du sol), les résultats sont concluants quelle que soit les classes à partir de la BDORTHO® IRC et l'image Worldview-2. Ils sont très bons aussi pour les végétations naturelles et semi-naturelles à partir des images SPOT5 contrairement aux milieux non végétalisés et aux végétations artificielles.

Au niveau 2 (Grands types de végétations), seuls les fourrés arbustifs et les parcs et jardins sont moyennement classés à partir de l'image Worldview-2. Les résultats sont en revanche très concluants pour les cultures, les plantations, les forêts, les végétations herbacées et les milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies. Le coefficient kappa au niveau 2 à partir de la BDORTHO® IRC et des images SPOT5 est très bon à bon, mais il masque une très grande variabilité de résultats entre classes. Les milieux non végétalisés, les parcs et jardins, les végétations

aquatiques marines, les fourrés nains, les végétations herbacées et les milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies sont très bien classées alors que les fourrés arbustifs, plantations et cultures présentent de nombreuses confusions entre classes. Ces confusions sont accentuées avec les images SPOT5 comme l'indique le coefficient kappa.

Au niveau 3 (Types de formations végétales), quelle que soit l'image, les résultats témoignent d'un nombre élevé de confusions entre les végétations pour que les procédures soient utilisées telles quelles. Seules les pelouses sur sable non fixé et les pelouses sur sable fixé sont bien identifiées. En incluant une étape de photo-interprétation, nous pourrions atteindre des taux de réussite très bons pour les forêts de conifères, les forêts de sclérophylles, les herbiers marins, les prairies hygrophiles et les végétations des prés salés. En revanche les résultats sont très mauvais pour les forêts mésophiles, les forêts hygrophiles, les fourrés mésophiles, les fourrés hygrophiles, les prairies mésophiles, les landes et garrigues, les tourbières à chaméphytes, les fourrés crassuléscentés, les roselières et cariçaies et les franges et lisières. Pour améliorer significativement la classification de ces végétations, des moyens plus conséquents devront être mis en œuvre, via notamment le recours à de la photo-interprétation et surtout, l'acquisition de couches SIG supplémentaires.

Les procédures de classification à partir de Worldview-2 demandent à être consolidées. Tous les grands types de végétation n'étant pas représentés sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay, nous ne connaissons pas la fiabilité de la méthode pour l'identification des fourrés nains (landes et garrigues, tourbières à chaméphytes et fourrés crassuléscentés) et des prés salés.

La méthode orientée-objet a montré un réel intérêt pour la caractérisation des grands types de végétation et pour la délimitation précise de plusieurs types de formations végétales. Il est désormais possible d'envisager la production d'une cartographie de « grands types de végétations » sur laquelle pourraient figurer des limites de végétations plus précises au plan typologique. Ce type de cartes faciliterait probablement le travail du phytosociologue sur le terrain ; cela reste néanmoins à tester. A l'inverse, d'un point de vue paysager, la caractérisation fine des formations végétales est intéressante pour mettre en évidence la continuité écologique entre secteurs à enjeux pour la biodiversité.

Des solutions existent pour améliorer les classifications mais ces solutions exigent un niveau de technicité plus ou moins important et un coût qui va de pair et qui sera à étudier en fonction des objectifs. Les différentes mesures à envisager sont :

- L'acquisition d'images multi-dates de plusieurs capteurs pour classer les roselières et cariçaies et distinguer les cultures/prairies temporaires des prairies permanentes,
- l'ajustement de certaines classes de la typologie afin de les rendre compatibles avec une procédure de traitement automatique,
- la photo-interprétation en post-traitement ce qui permettrait de supprimer un grand nombre d'erreurs,
- l'utilisation de données vectorielles de résolution spatiale compatible avec les objectifs de cartographie au 1/25 000 (données géologiques, zones à dominante humide, plantations). Nous insistons particulièrement sur les données concernant

les zones humides qui ne sont actuellement disponibles qu'au 1/50 000 mais qui, si elles étaient disponibles au 1/25 000, permettraient d'obtenir de très bons résultats pour la majorité des classes au niveau 3 de la typologie (types de formations végétales).

- l'utilisation de données altimétriques fine de type LiDAR qui permettrait de distinguer les forêts des fourrés d'une part et les différents types de végétations des prés salés d'autre part.

BIBLIOGRAPHIE

- AESN 2006. *Cartographie des zones à dominante humide du bassin Seine-Normandie*. Rapport final
- ALEXANDRIDIS T. K., LAZARIDOU E., TSIRIKA A., ZALIDIS G. C., 2009 - Using Earth Observation to update a Natura 2000 habitat map for a wetland in Greece. *Journal of Environmental Management*, **90**: 2243-2251.
- ALLENBACH K., BURNIER J., LEHMANN A., MARTIN P., RAY N., WYLER N., 2010 - *Cartographie des milieux naturels dans le périmètre Vuache-Sion-Laire : Rapport technique*. DGAT-Projet d'Agglo. 98 p., 4 annexes.
- BAKER C., LAWRENCE R., MONTAGNE C., PATTEN D., 2006 - Mapping wetlands and riparian areas using Landsat ETM+ imagery and decision-tree-based models. *WETLANDS*, **26** (2): 465-474.
- BAATZ M., HOFFMANN C., WILHAUCK G., 2008 – *Progressing from object-based to object-oriented image analysis*. In: BLASCHKE Th., LANG S., HAY G.J., 2008 - *Object-Based Image Analysis*. Springer. pp.275-290.
- BELLUCO E., CAMUFFO M., FERRARI S., MODENESE L., SILVESTRI S., MARANI A., MARANI M., 2006 - Mapping salt-marsh vegetation by multispectral and hyperspectral remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, **105**: 54-67.
- BENSETTITI F., PUISSAUVRE R., LEPAREUR F., TOUROULT J., MACIEJEWSKI L., 2012 - *Evaluation de l'état de conservation des habitats et des espèces d'intérêt communautaire – Guide méthodologique – DHFF article 17, 2007-2012. Version 1 - Février 2012. Rapport SPN 2012-27*. Paris : Muséum National d'Histoire Naturelle. Service du patrimoine naturel, 1 vol. 76 p.
- BOCK M., 2003 - Remote sensing and GIS-based techniques for the classification and monitoring biotopes. Case example for a wet grass and moor land area in Northern Germany. *Journal for Nature Conservation*, **11**: 145-155.
- BOCK M., XOFIS P., MITCHLEY J., ROSSNER G., WISSEN M., 2005 - Object-oriented methods for habitat mapping at multiple scales - Case studies from Northern Germany and Wye Downs, UK. *Journal for Nature Conservation*, **13**: 75-89.
- BOCK M., ROSSNER G., WISSEN M., REMM K., LANGANKE T., LANG S., KLUG H., BLASCHKE T., VRSCAJ B., 2005 - Spatial indicators for nature conservation from European to local scale. *Ecological Indicators*, **5**: 322-338
- BONN F., ROCHON G., 1992 - *Précis de télédétection, vol. 1 Principes et méthodes*. Universités Francophones, Presses de l'Université du Québec. 234 p.
- BOURGET E., LE DÛ-BLAYO L., 2010 - Cartographie des paysages : apport à l'analyse des trames vertes et bleues-L'exemple du Pays de Saint-Brieuc. *Projets de paysages*. Publié le 18 juillet 2010 [en ligne]. URL: http://www.projetsdepaysage.fr/fr/cartographie_des_paysages_apport_a_l_analyse_des_trames_vertes_et_bleues (page consultée le 13 octobre 2011).
- BRUNET J.-B., RENAUD J., 2010 - *Méthodologie de cartographie des milieux naturels et semi-naturels. Apport de la télédétection satellitale - Milieux ouverts d'altitude*. Cemagref-UR Ecosystèmes montagnards-Centre de Grenoble. 74 p., 2 annexes.
- CONGALTON R., 1991 – A review of assessing the accuracy of classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing Environment*, **37** : 35-46
- CORGNE S., NABUCET J. ET BAH F., 2009 - *Détermination de l'occupation du sol sur le bassin de la vie et du Jaunay par télédétection*, LETG Rennes COSTEL, 33 p.
- COUZY A., 1981 - *La télédétection*. Presses universitaires de France : 1919. 128 p.

DELIASSUS L., MAGNANON S., BOUGAULT C., 2009 - *Propositions pour la structuration d'un PÔLE HABITATS pour les régions Basse-Normandie, Bretagne et Pays-de-la-Loire*. Conservatoire Botanique National de Brest. 29 p., 1 annexe.

DELIASSUS L., MAGNANON S., 2012 - *Classification des végétations de Basse-Normandie, de Bretagne et des Pays de la Loire* - Version 1. Conservatoire Botanique National de Brest. 54 p., 2 annexes.

DELIASSUS L., MAGNANON S., 2013 – Une classification emboîtée de la végétation de Basse-Normandie, Bretagne et des Pays de la Loire. Brest. *Journal de Botanique*. A paraître.

DIARD L. 2005 - *La flore d'Ille et Vilaine*. Siloë. 670 p.

DIAZ VARELA R. A., RAMIL REGO P., CALVO IGLESIAS S., MUNOZ SOBRINO C., 2008 - Automatic habitat classification methods based on satellite images : a practical assessment in the NW Iberia coastal mountains. *Environmental Monitoring and Assessment*, **144** (1-3): 229-250.

DORIAN M., BARRY W., 1991 - *CORINE biotopes: The design, compilation and use of an inventory of sites of major importance for nature conservation in the European Community*. Luxembourg, Belgium: Office for Official Publications of the European Communities. 132 p.

DUPONT P., 1962 - *La flore atlantique européenne. Introduction à l'étude du secteur ibéro-atlantique*. Toulouse, Faculté des Sciences de Toulouse, Centre National de la Recherche Scientifique, 414 p.

DUPONT P., 1967 - L'utilisation des réseaux en cartographie floristique ; perspectives européennes et perspectives françaises », *Compte rendu des séances de la Société de biogéographie*, **382** : 14-19

DURFORT J., 2009 – *Cartographie du site Natura 2000 « Complexe du Menez Hom » FR 5300014 – Notice descriptive des habitats naturels de la cartographie Natura 2000 « Complexe du Menez Hom »*, 102 p. + Annexes

ECKERT S., 2012 - Improved Forest Biomass and Carbon Estimations Using Texture Measures from WorldView-2 Satellite Data. *Remote Sensing*, **4**(4), pp. 810–829.

EISFELDER C., KRAUS T., BOCK M., WERNER M., BUCHROITHNER M. F., STRUNZ G., 2009 - Towards automated forest-type mapping - a service within GSE Forest Monitoring based on SPOT5 and IKONOS data. *International Journal of Remote Sensing*, **30** (19): 5015-5038.

FGDC, 2008 - *National vegetation classification standard, version 2*. FGDC-STD-005-2008. Vegetation subcommittee, Federal Geographical Data, FGDC secretariat, U.S. Geological Survey, Reston, VA. 119 p. URL: http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards/projects/vegetation/NVCS_V2_FINAL_2008-02.pdf

FILLOL N., WETTON J.-B., PNRMCB , 2003 - *Réserve Naturelle de la Sangsurière et de l'Adriennerie. Evaluation du plan de gestion 1997-2002*. 60 p.

FÖRSTER M., KLEINSCHMIT B., 2008 - *Object-based classification of QuickBird data using ancillary information for the detection of forest types and NATURA 2000 habitats*. In: BLASCHKE Th., LANG S., HAY G.J., 2008 - *Object-Based Image Analysis*. Springer. pp.275-290.

FROHN R. C., REIF M., LANE C., AUTREY B., 2009 - Satellite remote sensing of isolated wetlands using object-oriented classification of LANDSAT-7 data. *WETLANDS*, **29** (3): 931-941.

FULLER L. M., MORGAN T. R., AICHELE S. S., 2006 - *Wetland delineation with IKONOS high resolution satellite imagery, Fort Custer Training Center, Battle Creek, Michigan, 2005*: U.S. Geological Survey. Scientific Investigations Report 2006-5051, 8p.

GAO Y., MAS J. F., 2008 - A comparison of the performance of pixel-based and object-based classifications over images with various spatial resolutions. *Online Journal of Earth Sciences*, **2**: 27-35.

GEHU J.-M., 2006 - *Dictionnaire de sociologie et synécologie végétales*, SCHWEIZERBARTSCHE VERLAG J. Cramer, Amicale francophone de Phytosociologie-Fédération internationale de Phytosociologie, 899 p.

GENÇ L., DEWITT B., SMITH S., 2004 - Determination of Wetland Vegetation Height with LiDAR. *Turkish Journal of agriculture and forestry*, **28**(1), pp. 63-71.

GIANNETTI F., PIA S., GUASCO V., 2010 - *Habitat mapping through remote sensing in Piemonte region: a methodological approach*. In: Second Habitats workshop, 2010, Brussels. *Monitoring Europe's biodiversity in a post 2010 era: the role of remote sensing for Natura 2000 reporting and ecosystem assessment*.

Présentation du projet sur le site du programme HABISTAT [en ligne].

http://habistat.vgt.vito.be/modules/Downloads/workshop2010/09_GIANETTI.pdf (page consultée le 29 août 2011)

GIP Loire Estuaire, 2012 – *Apports de l'Ortho-image Infrarouge Couleur pour la cartographie des habitats naturels dans la vallée de la Loire des Ponts-de-Cé à Saint Nazaire*. 71p. + Annexes

GIRARD M.-C., GIRARD C. M., 2010 - *Traitement des données de télédétection* - Environnement et ressources naturelles. éd. 2. Dunod. 554 p.

GLEMAREC E, LE BELLOUR A., 2010 - *SITE NATURA 2000 N°FR 5200655 : Dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay - Inventaire et cartographie des habitats terrestres et des espèces végétales et animales d'intérêt communautaire*. TBM. 90 p. + Annexes

GOURMELON F., BIORET F., SAUVE L., 2005 - Potentialité de l'imagerie satellitaire SPOT5 pour la cartographie de la végétation terrestre. Application à l'île d'Ouessant. *Cybergeo : Revue européenne de géographie, Cartographie, Imagerie, SIG*, article 325, mis en ligne le 09 novembre 2005, modifié le 29 juin 2007. URL : <http://cybergeo.revues.org/3027> (page consultée le 13 octobre 2011).

HAEST B., 2010 - *From hyperspectral images to Natura 2000 habitat patches and quality indicator maps: results from the HABISTAT project*. In: Second Habitats workshop, 2010, Brussels. *Monitoring Europe's biodiversity in a post 2010 era: the role of remote sensing for Natura 2000 reporting and ecosystem assessment*. Présentation disponible sur le site du programme HABISTAT [en ligne].

http://habistat.vgt.vito.be/modules/Downloads/workshop2010/03_HAEST.pdf (page consultée le 29 août 2011)

HAEST B., THOONEN G., VANDEN BORRE J., SPANHOVE T., DELALIEUX S., BERTELS L., KOOISTRAD L., MÜCHER C. A., SCHEUNDERS P., 2011 - *An object-based approach to quantity and quality assessment of heathland habitats in the framework of Natura 2000 using hyperspectral airborne AHS images*. In: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII-4/C7. 6 p.

HUBERT-MOY L., MICHEL K., CORPETTI T., 2006 - *Object-oriented mapping and analysis of wetlands using SPOT5 data*. In: IGARSS, 2006, États-Unis d'Amérique. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE International Conference. p. 3447-3450.

I-MAGE CONSULT, 2006 – *Cartographie des zones à dominante humide du bassin de la Dordogne*. AESN. 47p.

L'IF, 2008 - Nouvelle cartographie forestière De la production à l'utilisation. **20**. 8p.

IGN, 2011 – BDORTHO® Version 2 – Descriptif de contenu. 17p.

JANVRE A., DEBAINE F., 2012 – *Cartographie de la végétation et validation de protocoles de traitement d'images* - Rapport de stage (été 2012). 25p.

KAMAGATA N., HARA K., MORI M., AKAMATSU Y., LI Y., HOSHINO Y., 2008 - *Object-based classification of IKONOS data for vegetation mapping in Central Japan*. In: BLASCHKE Th., LANG S., HAY G.J., 2008 - *Object-Based Image Analysis*. Springer. pp.459-475.

KERGOMARD C., 2000 – Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC. In *Cybergeo : European Journal of Geography* [en ligne], Dossiers, Actes des journées de Télédétection en Sciences humaines, document 181, mis en ligne le 05 mai 2000, consulté le 25 novembre 2011. URL : <http://cybergeo.revues.org/1679;DOI:10.4000/cybergeo.1679>

LACROIX P., MAGNANON S., BRINDEJONC O., HOPKINS F., LE BAIL J., TRAVERTE N., 2003 - *Elaboration d'un état de référence de la flore et de la végétation littorales terrestres de Bretagne et des Pays de la Loire. Un outil opérationnel pour connaître et conserver le patrimoine végétal du littoral*. Rapport final. Brest : Conservatoire botanique national de Brest, 45 p

LECERF. R., 2008 – *Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (application à la Bretagne)*. Thèse de doctorat. Université de Rennes 2, Rennes, 326p. URL : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00337099/en/>

LEGUEDOIS S., PARTY J.-P., DUPOUEY J.-L., GAUQUELIN T., GEGOUT J.-C., Caroline LECAREUX C., BADEAU V., PROBST A., 2011 - La carte de végétation du CNRS à l'ère du numérique, *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, article 559, mis en ligne le 27 octobre 2011, consulté le 15 janvier 2013. URL : <http://cybergeo.revues.org/24688> ; DOI : 10.4000/cybergeo.24688

LE REST M. et al, 2009 - *Document d'objectifs du site Natura 2000 FR 2500081 « Havre de Saint-Germain-sur-Ay et Landes de Lessay »*. DIREN Basse-Normandie, Parc Naturel Régional des Marais du Cotentin et du Bessin – CPIE du Cotentin, Lessay, 118 p. + Annexes.

LEWINSKI S., 2005 - Land use classification of ASTER image - Legionowo test site. In: *Proceedings of the 25th EARSeL Symposium* (Portugal, 2005). 8 p.

LUCAS R., ROWLANDS A., BROWN A., KEYWORTH S., BUNTING P., 2007 – Rule-based classification of multi-temporal satellite imagery for habitat and agricultural land cover mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **62**: 165-185.

LUCAS R., MEDCALF K., BROWN A., BUNTING P., BREYER J., CLEWLEY D., KEYWORTH S., BLACKMORE P., 2011 - Updating the Phase 1 habitat map of Wales, UK, using satellite sensor data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **66**: 81-102.

MAGNANON 1992 - L'inventaire et la cartographie de la flore armoricaine. Guide méthodologique pour le recueil et la gestion des données de terrain. *Erica*, **1** : 7-18

MALLINIS G., KOUTSIAS N., TSAKIRI-STRATI M., KARTERIS M., 2008 - Object-based classification using Quickbird imagery for delineating forest vegetation polygons in a Mediterranean test site. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **63**: 237-250.

MEDCALF K., LUCAS R., BROWN A., 2010 – Habitat mapping in Wales using multiple date remote sensing imagery. In: Second Habitats workshop, 2010, Brussels. *Monitoring Europe's biodiversity in a post 2010 era: the role of remote sensing for Natura 2000 reporting and ecosystem assessment*.

Présentation disponible sur le site du programme HABISTAT [en ligne].
<http://habistat.vgt.vito.be/modules/Downloads/?????.pdf> (page consultée le 29 août 2011).

MEHNER H., CUTLER M., FAIRBAIRN D., THOMPSON G., 2004 - Remote sensing of upland vegetation: the potential of high spatial resolution satellite sensors. *Global Ecology and Biogeography*, **13**: 359-369.

MIKOLAJCZAK A., 2009 - *Mise en place d'un référentiel des formations végétales (physionomie) au CBNA*. Gap : Conservatoire botanique National Alpin. 18p.

MORE G., PONS X., BURRIEL J. À., CASTELLS R., IBAÑEZ J. J., ROIJALS X., 2005 - *Generació de cartografia detallada de vegetació mediante procesamiento digital de imágenes Landsat, variables orográficas y climáticas*. 6th Geomatic Week proceedings CD-ROM: Dep.legal: B-8737-(2005) Fichero: T15.doc (ISSN 1699-3489). 9 p.

MUTANGA O., ADAM E., CHO M.A., 2012 - High density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18(0), pp. 399-406.

NOVACK T., ESCH T., KUX H., STILLA U., 2011 - Machine Learning Comparison between WorldView-2 and QuickBird-2-Simulated Imagery Regarding Object-Based Urban Land Cover Classification. *Remote Sensing*, 3(10), pp. 2263–2282.

OLIVIER J., HENDOUX F., GAUDILLAT V., DESHAYES M., 2010 - *Cadre méthodologique pour une cartographie nationale des végétations naturelles et semi-naturelles terrestres en France (2010-2018)*. FCBN, MNHN-SPN, Cemagref, MEEDDM, Paris, 157 p., 9 annexes. *En cours de rédaction*

OLSSON B., 2010 - Photo-interprétation and remote sensing methods used for Swedish Natura 2000 mapping. In: Second Habitats workshop, 2010, Brussels. *Monitoring Europe's biodiversity in a post 2010 era: the role of remote sensing for Natura 2000 reporting and ecosystem assessment*. Présentation disponible sur le site du programme HABISTAT [en ligne]. http://habistat.vgt.vito.be/modules/Downloads/workshop2010/04_OLSSON.pdf (page consultée le 29 août 2011).

ORUC M., MARANGOZ A. M., BUYUKSALIH G., 2004 - *Comparison of pixel-based and object-oriented classification approaches using Landsat-7 ETM spectral bands*. In: ISPRS Congress, Proceedings of Commission IV (Istanbul, 2004). 5p.

OTA T., MIZOUE N., YOSHIDA S., 2010 - Influence of using texture information in remote sensed data on the accuracy of forest type classification at different levels of spatial resolution. *Journal of forest research*. DOI: 10.1007/s10310-010-0233-6. 6 p.

OUYANG Z.-T., ZHANG M.-Q., XIE X., SHEN Q., GUO H.-Q., ZHAO B., 2011 - A comparison of pixel-based and object-oriented approaches to VHR imagery for mapping saltmarsh plants. *Ecological informatics*, 6 : 136-146.

PHILIPPON D., PRELLI R., POUX L., 2006 - *La Flore des Côtes d'Armor*. Siloë. 566 p.

QUERE E., MAGNANON S., RAGOT R., GAGER L., HARDY F., 2008 – *La flore du Finistère*. Siloë. 696 p.

RAPINEL S., HUBERT-MOY L., CLEMENT B., 2011 – Using LiDAR data to evaluate wetland functions. 34th *International Symposium for Remote Sensing of Environment*, Sydney, Australie, 10-15 Avril

RAPINEL S., 2012 – *Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humides : de l'observation à la modélisation prospective*. Thèse de doctorat. Université Rennes 2, Rennes, 384p. URL : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00731169/>

RAPINEL S., HUBERT-MOY L., 2012 – *Cartographie automatique des végétations du site de Sauzaie-Jaunay (Vendée) à partir d'une image à très haute résolution Worldview-2*. Conservatoire Botanique National de Brest. 36p.

RENAUD J., BRETON V., LUQUE S., 2010 - *Intérêts de la télédétection pour la cartographie des habitats naturels : application aux milieux forestiers*. Cemagref-UR Ecosystèmes montagnards-Centre de Grenoble. 27p., 5 annexes.

RIVIERE G., 2007 – *La flore du Morbihan*. Siloë. 655 p.

ROCHE P., BOUILLON C., LONG M., 2010 - *Note de synthèse cartographie des habitats naturels Méditerranéens*. Cemagref-UR EMAX-Centre d'Aix-en-Provence. 21p.

SANCHEZ-HERNANDEZ C., BOYD D. S., FOODY G. M., 2007 - Mapping specific habitats from remotely sensed imagery: support vector machine and support vector data description based classification of coastal saltmarsh habitats. *Ecological informatics*, **2**: 83-88.

SAPIENZA-UNIVERSITA DI ROMA, 2011 - 20th International workshop of European vegetation survey, Book of abstract. 158p.

SIRS (SYSTEME D'INFORMATION A REFERENCE SPATIALE), 2009 - *Evaluation des conditions de la biodiversité dans le Kent et le Nord Pas de Calais : Photo-interprétation, Base de données et cartographie régionale et transfrontalière des habitats naturels*. Cahier des clauses techniques particulières. SIRS. 30 p., 4 annexes.

SIRS (SYSTEME D'INFORMATION A REFERENCE SPATIALE), 2010 – *Guide méthodologique illustré de PIAO, Version de travail*. SIRS. 39 p.

SPARFEL L., GOURMELON F., Le BERRE I., 2008 - Approche orienté-objet de l'occupation des sols en zone côtière. *Téledétection*, **8** (4) : 237-256. URL: <http://www.teledetection.net/index.asp?lg=1&menu=339&mm=304&Filtre=39&Nomidretour=&NomLibRetour=idNUMERO&popup=&format=292&titreformat=Accueil.&mc=&vue=&pg=1&rech=&tri=&mode=F&id=367&rc=2&bouton=&hc=1> (page consultée le 13 octobre 2011)

SPARFEL L., LE BERRE I., GOURMELON F., 2011 - Évaluation des changements d'occupation des sols en zone côtière à partir de données hétérogènes. *Revue internationale de géomatique*, **21** (3): 381-403. doi:10.3166/rig.15.381-403.

SPARFEL L., 2011 - *Etude des changements d'occupation des sols dans la zone côtière à partir de données hétérogènes : application au Pays de Brest*. Thèse de doctorat. Université de Bretagne occidentale, Brest. 245p. URL : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00636846>

SCHWARZER S., ALLENBACH K., JAQUET J.-M., 2009 - Cartographie semi-automatisée et multi-sources de la couverture du sol. 1. Périmètre de l'agglomération franco-valdo genevoise (CCSA04, moyenne résolution). *Archive des sciences*, **62** : 107-124.

STEINBERG J., 2000 - *Cartographie. Télédétection Système d'information géographique*. Paris : SEDES. 160 p.

TALBOT S. S., MEADES W. J., 2011 - Circumboreal Vegetation Map (CBVM): Concept Paper. *CAFF Strategy Series Report No. 3. CAFF Flora Group (CFG), CAFF International Secretariat, Akureyri, Iceland*. 16 p. URL : http://caffportal.arcticportal.org/images/Reports/Strategy%20Series/CBVM%20Final_13072011.pdf (page consultée le 13 octobre 2011)

TBM, 2007 – *Mission de cartographie des habitats terrestres par traitement automatique d'images*. Rapport pour le Conservatoire Botanique National de Brest. 31p.

TRIEPKE F. J., BREWER C. K., LEAVELL M. D., NOVAK J. S., 2008 - Mapping forest alliances and associations using fuzzy systems and nearest neighbor classifiers. *Remote Sensing of Environment*, **112**: 1037-1050.

TUXEN K., KELLY M., 2008 - *Multi-scale functional mapping of tidal marsh vegetation using object-based image analysis*. In: BLASCHKE Th., LANG S., HAY G.J., 2008 - *Object-Based Image Analysis*. Springer. pp.415-442.

VANDEN-BORRE J., PAELINCKX D., MÜCHER C. A., KOOISTRA L., HAEST B., DE BLUST G., SCHMIDT A. M., 2011 – Integrating remote sensing in Natura 2000 habitat monitoring: Prospects on the way forward. *Journal for Nature Conservation*, **19**: 116-125.

WILLHAUCK G., 2000 - *Comparison of object oriented classification techniques and standard image analysis for the use of change detection between SPOT multispectral satellite images and aerial photos*. Archives XXXIII. p.214-221

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Présentation du CBN de Brest (Delassus et al. 2009)

Figure 2 : Evolution des techniques d'imagerie de 1839 à aujourd'hui

Figure 3 : Les principales étapes de l'approche orientée-objet (a : image brute (BDORTHO® IRC) ; b: image segmentée en objets ; c : les objets de l'image sont classés)

Figure 4 : Evolution des techniques de cartographie des végétations par traitements d'images et des typologies de la végétation

Figure 5 : Diagramme méthodologique du projet

Figure 6 : Influence des critères floristiques et physionomiques sur la classification

Figure 7 : Localisation des sites d'étude

Figure 8 : Extrait des images sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay (de gauche à droite : Worldview-2, BDORTHO® IRC, SPOT5)

Figure 9 : Exemple de fossé sur le site des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie. Les types de végétations sont très imbriqués. Certaines végétations (forestières) en masquent d'autres (herbacées et aquatiques).

Figure 10 : Exemple d'application de la « Chessboard segmentation »

Figure 11 : Exemple d'application de la « Contrast split segmentation »

Figure 12 : Exemple d'application de la « Multiresolution segmentation »

Figure 13 : Exemple d'application de la « Spectral difference segmentation »

Figure 14 : Diagramme méthodologique élaboré à partir de la BDORTHO® IRC (les couleurs font le lien avec les différents niveaux de la typologie emboîtée)

Figure 15 : Extrait d'une image non fusionnée (gauche) et fusionnée (droite)

Figure 16 : Diagramme méthodologique élaboré à partir de l'image SPOT 5 (les couleurs font le lien avec les différents niveaux de la typologie emboîtée)

Figure 17 : Extrait sur le site des dunes de la Sauzaie de l'image non fusionnée (gauche) et fusionnée (droite)

Figure 18 : Diagramme méthodologique élaboré à partir de l'image WorldView-2 (les couleurs font le lien avec les différents niveaux de la typologie emboîtée)

Figure 19 : Localisation des échantillons d'entraînement pour la classification supervisée

Figure 20 : Procédure d'attribution de la classe majoritaire aux objets (a : image Worldview-2 ; b : segmentation avec création d'objets ; c : classification de type pixel ; d : croisement de la classification pixel avec les couche objet)

Figure 21 : Exemple de cultures en début de développement qui sont classées en landes

Figure 22 : Exemple de zone piquetée par les pins sur le site du Menez-Hom

Figure 23 : Extrait de la classification sur la zone du mont de Doville (Site de la Sangsurière)

Figure 24 : Linéaire de roselière en bordure d'un fossé sur les marais du Jaunay (BDORTHO® IRC)

Figure 25 : Extrait de l'image SPOT et de la classification sur le site du Menez-Hom

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les typologies d'habitats en vigueur en Europe

Tableau 2 : Classification de la végétation proposée pour les régions Basse-Normandie, Bretagne et pays de la Loire (Delassus et Magnanon 2013)

Tableau 3 : Recensement des études de cartographie des grands types de végétation par photo-interprétation

Tableau 4 : Recensement des études de cartographie des grands types de végétation par la méthode pixel

Tableau 5 : Comparaison de la méthode pixel et de l'approche orientée-objet

Tableau 6 : Recensement des études de cartographie des grands types de végétation par approche orientée-objet

Tableau 7 : Description des sites d'étude

Tableau 8 : Caractéristiques techniques des images satellitaires et aériennes

Tableau 9 : Caractéristiques des images satellitaires utilisées

Tableau 10 : Données auxiliaires vectorielles utilisées pour les classifications de chaque type d'image

Tableau 11 : Données auxiliaires matricielles utilisées pour les classifications de chaque type d'image

Tableau 12 : Description des classes de la « typologie de travail » (Noir : Classe de formation ; Rouge : Sous-classe de formation ; Orange : Formation ; Beige : Division ; Jaune : Macrogroupe)

Tableau 13 : Superficie en km² des images

Tableau 14 : Paramètres de segmentation pour la BDORTHO® IRC (eCognition)

Tableau 15 : Superficie en km² des images SPOT traitées

Tableau 16 : Paramètres de segmentation pour l'image SPOT 5

Tableau 17 : Paramètres de segmentation multirésolution utilisés sur les images multispectrales et fusionnées

Tableau 18 : Exemple de matrice de confusion

Tableau 19 : Dates des campagnes de prospection et nombre de points de validation par site au total

Tableau 20 : Description des niveaux de classification

Tableau 21 : Bilan des coefficients kappa pour chaque site et chaque niveau de validation

Tableau 22 : Bilan des coefficients kappa pour chaque site et chaque niveau de validation

Tableau 23 : Bilan des coefficients kappa pour chaque niveau de validation

Tableau 24 : Bilan des résultats obtenus par image, par niveau et par végétation sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay : les chiffres correspondent aux taux d'identification, les couleurs, aux pourcentages d'identification (Vert : 0-30% ; Orange : 31-50% ; Rouge : 51-100%)

Tableau 25 : Bilan des résultats obtenus par image (SPOT5, BDORTHO® IRC), par niveau et par végétation sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay : les chiffres correspondent aux moyennes des taux d'identification, les couleurs, aux moyennes des pourcentages d'identification (Vert : 0-30% ; Orange : 31-50% ; Rouge : 51-100%)

Tableau 26 : Coûts et temps de traitement des données nécessaires aux traitements à partir de la BDORTHO® IRC

Tableau 27 : Coûts et temps de traitement des données nécessaires aux traitements d'une image SPOT5

Tableau 28 : Coûts et temps de traitement des données nécessaires aux traitements d'une image Worldview-2

Tableau 29 : Récapitulatif des tarifs pour les trois types d'images pour une superficie de 100km² et au niveau « Type de formation végétale ».

Tableau 30 : Facteurs limitant et recommandations pour l'identification des différentes classes de végétation (+ : coût et technicité peu élevés ; +++ : coût et technicité élevés)

Tableau 31 : Coefficients kappa pour les trois niveaux pour les trois images sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Premiers niveaux de la typologie emboîtée des végétations du CBN de Brest

Annexe 2 : Imageries aériennes et satellitaires des sites d'études

- 2.1 Complexe du Menez-Hom
- 2.2 Dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay
- 2.3 Havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay
- 2.4 Marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie

Annexe 3 : Exemple d'images de texture dérivée des ortho-image et de Worldview-2 sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay

Annexe 4 : Localisation des points de validation par site

- 4.1 Complexe du Menez-Hom
- 4.2 Site des dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay
- 4.3 Havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay
- 4.4 Marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie

Annexe 5 : Cartographies et matrices de confusion du site « Complexe du Menez-Hom »

- 5.1 Niveau « Occupation du sol »
- 5.2 Niveau « Grands types de milieux »
- 5.3 Niveau « Types de formations végétales »

Annexe 6 : Cartographies et matrices de confusion du site « Marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie »

- 6.1 Niveau « Occupation du sol »
- 6.2 Niveau « Grands types de milieux »
- 6.3 Niveau « Types de formations végétales »

Annexe 7 : Cartographies et matrices de confusion du site «Dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay»

- 7.1 Niveau « Occupation du sol »
- 7.2 Niveau « Grands types de milieux »
- 7.3 Niveau « Types de formations végétales »

Annexe 8 : Cartographies et matrices de confusion du site «Havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay»

- 8.1 Niveau « Occupation du sol »
- 8.2 Niveau « Grands types de milieux »
- 8.3 Niveau « Types de formations végétales »

Annexe 9 : Rapport joint : Catalogues des traitements par grands types de végétation.

- 9.1 BDORTHO® IRC
- 9.2 SPOT5
- 9.3 Worldview-2

Annexe 10 : Rapport joint : Cartographie de la végétation et validation de protocoles de traitement d'image.

Annexe 11 : Rapport joint : Cartographie automatique des végétations du site de Sauzaie Jaunay (Vendée) à partir d'une image à très haute résolution Worldview-2.

ANNEXE 1

Premiers niveaux de la typologie emboîtée des végétations du CBN de Brest (Delassus et Magnanon 2013)

Classe	Sous-Classe	Formation	Division	Macro-groupe	Nom Français
					Forêts
					Forêts caducifoliées
					Forêts caducifoliées (des régions tempérées)
					Forêts hygrophiles
					Forêts marécageuses
					Forêts riveraines et alluviales
					Forêts mésophiles
					Forêts mésophiles neutro-acidiclines à calcicoles
					Forêts mésophiles à mésohygrophiles acidiphiles
					Forêts mésoxérophiles à xérophiles
					Forêts mésoxérophiles à xérophiles planitaires à montagnardes
					Forêts sempervirentes
					Forêts de conifères (des régions tempérées)
					Forêts de sclérophylles
					Forêts de sclérophylles (des régions tempérées)
					Forêts de sclérophylles méditerranéennes
					Forêts mixtes
					Fourrés arbustifs
					Fourrés caducifoliés
					Fourrés de feuillus caducifoliés
					Fourrés hygrophiles
					Fourrés marécageux
					Fourrés alluviaux et riverains
					Fourrés mésophiles et mésohygrophiles
					Fourrés mésophiles à mésohygrophiles, des sols riches
					Fourrés mésophiles à mésohygrophiles, des sols pauvres et acides
					Fourrés mésoxérophiles à xérophiles
					Fourrés mésoxérophiles à xérophiles, neutro-acidiclines à calcicoles
					Fourrés mésoxérophiles à xérophiles, acidiphiles
					Fourrés sempervirents
					Fourrés arbustifs sempervirents
					Fourrés sempervirents hygrophiles
					Fourrés à Tamaris
					Fourrés nains
					Fourrés nains sempervirents
					Tourbières à chaméphytes
					Tourbières à Ericacées
					Tourbières eurosibériennes
					Landes et garrigues
					Landes
					Landes planitaires à montagnardes
					Garrigues
					Fourrés nains extrêmement xéromorphes
					Fourrés crassuléscentes
					Fourrés crassuléscentes halophiles
					Fourrés crassuléscentes littoraux
					Végétation herbacée
					Formations éphémères
					Pelouses annuelles
					Pelouses annuelles halophiles
					Pelouses annuelles halophiles littorales
					Pelouses annuelles amphibies
					Pelouses annuelles amphibies oligotrophiles
					Pelouses annuelles amphibies eutrophiles
					Pelouses annuelles xérophiles
					Pelouses annuelles alcalines
					Pelouses annuelles acidiphiles
					Ourlets annuels
					Pelouses annuelles des milieux artificialisés
					Communautés commensales des cultures
					Friches annuelles
					Communautés annuelles piétinées
					Communautés éphémères crassuléscentes
					Communautés crassuléscentes halophiles
					Communautés éphémères des vases salées
					Végétations éphémères des laisses de mer
					Hémicryptophytales
					Prairies et pelouses (des régions tempérées)
					Prairies et pelouses halophiles
					Prairies des vases salées
					Prés salés
					Pelouses aérohalines
					Prairies et pelouses amphibies
					Pelouses oligotrophiles amphibies ibéro-atlantiques
					Pelouses oligotrophiles amphibies méditerranéennes
					Prairies et pelouses des bas-marais et radeaux flottants
					Prairies hygrophiles
					Prairies marécageuses
					Prairies inondables
					Pelouses mésophiles à xérophiles
					Pelouses des levées de galets et sables grossiers littoraux
					Pelouses dunaires

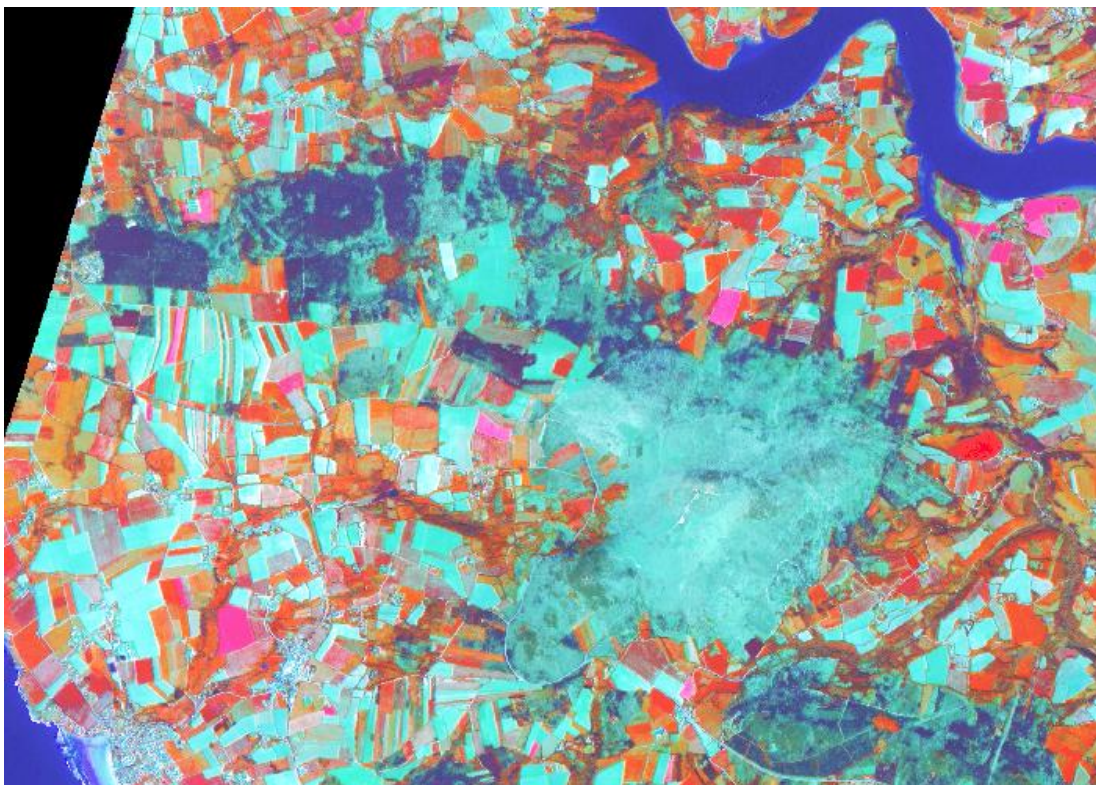
					Pelouses sur sables fixés
					Pelouses des sols compacts calcaires
					Pelouses des sols compacts acides
					Prairies mésophiles
					Prairies mésophiles européennes
					Prairies sub-rudérales
					Franges et lisières
					Mégaphorbiaies
					Mégaphorbiaies planitiaies à montagnards
					Mégaphorbiaies montagnardes
					Ourlets mésophiles à xérophiles
					Ourlets calcicoles à acidoclins
					Ourlets acidiphiles
					Ourlets et friches nitrophiles
					Ourlets nitrophiles
					Ourlets des coupes forestières
					Friches nitrophiles
					Végétations des rochers et parois
					Pelouses des fissures des murs et rochers (chasmophytiques)
					Pelouses des suintements sur parois rocheuses
					Pelouses des parois rocheuses
					Pelouses nitrophiles des parois et vieux murs
					Pelouses des replats rocheux
					Pelouses épilithiques
					Pelouses des dalles rocheuses
					Pelouses des éboulis
					Pelouses des éboulis collinéens à montagnards
					Pelouses des éboulis alpins
					Hélophytaies
					Parvoroselières
					Parvoroselières NN
					Prairies flottantes
					Parvoroselières fontinales
					Parvoroselières fontinales européennes
					Roselières et cariçaies
					Cariçaies
					Cariçaies européennes
					Roselières
					Roselières européennes
					Végétation aquatique
					Herbiers flottants
					Voiles flottants
					?
					Voiles flottants à Lemnacées
					Herbiers non enracinés
					?
					Herbiers non enracinés des eaux mésotrophes à eutrophes
					Herbiers non enracinés des eaux dystrophes à oligotrophes
					Herbiers fixés au substrat
					Herbiers algaux
					Herbiers algaux marins
					Herbiers algaux intérieurs
					Herbiers de characées
					Herbiers phanérophytiques
					Herbiers phanérophytiques marins
					Herbiers marins phanérophytiques
					Herbiers phanérophytiques intérieurs
					Herbiers saumâtres
					Herbiers dulçaquicoles phanérophytiques

ANNEXE 2

2.1 Complexe du Menez-Hom



BDORTHO® IRC



SPOT5

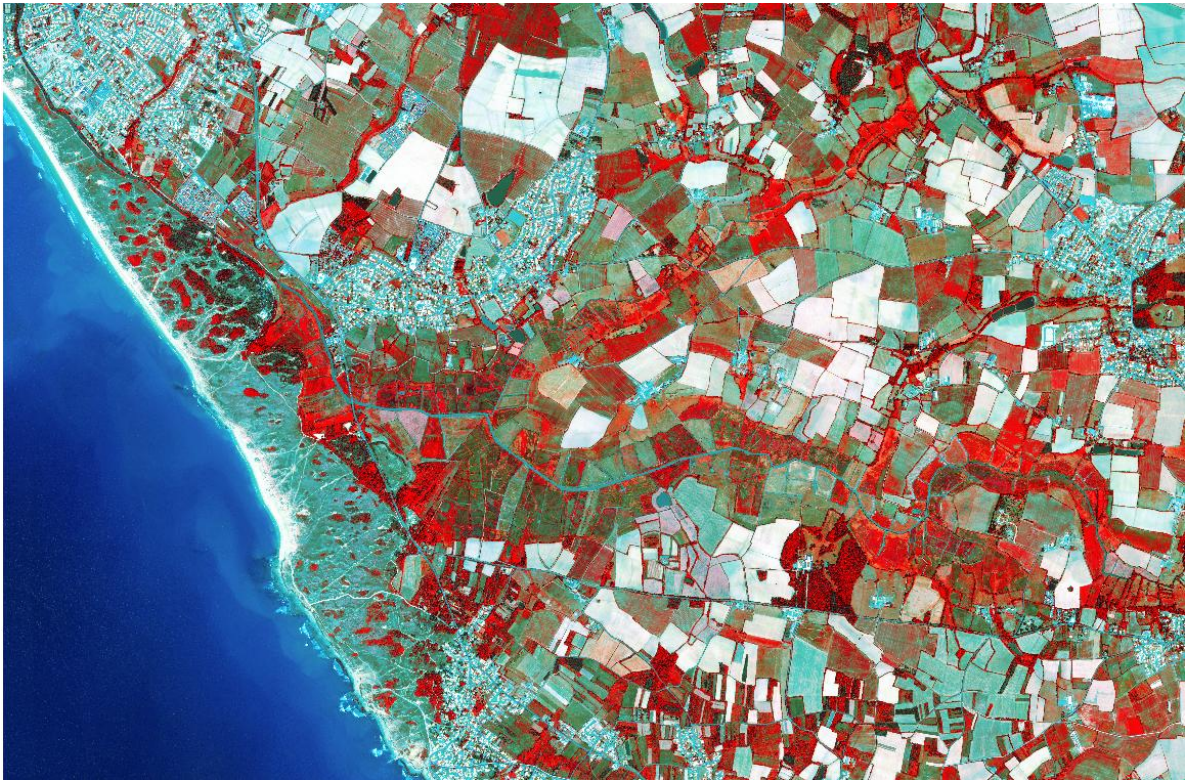
2.2 Dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay



BDORTHO® IRC



SPOT5



Worldview-2

2.3 Marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie



BDORTHO® IRC

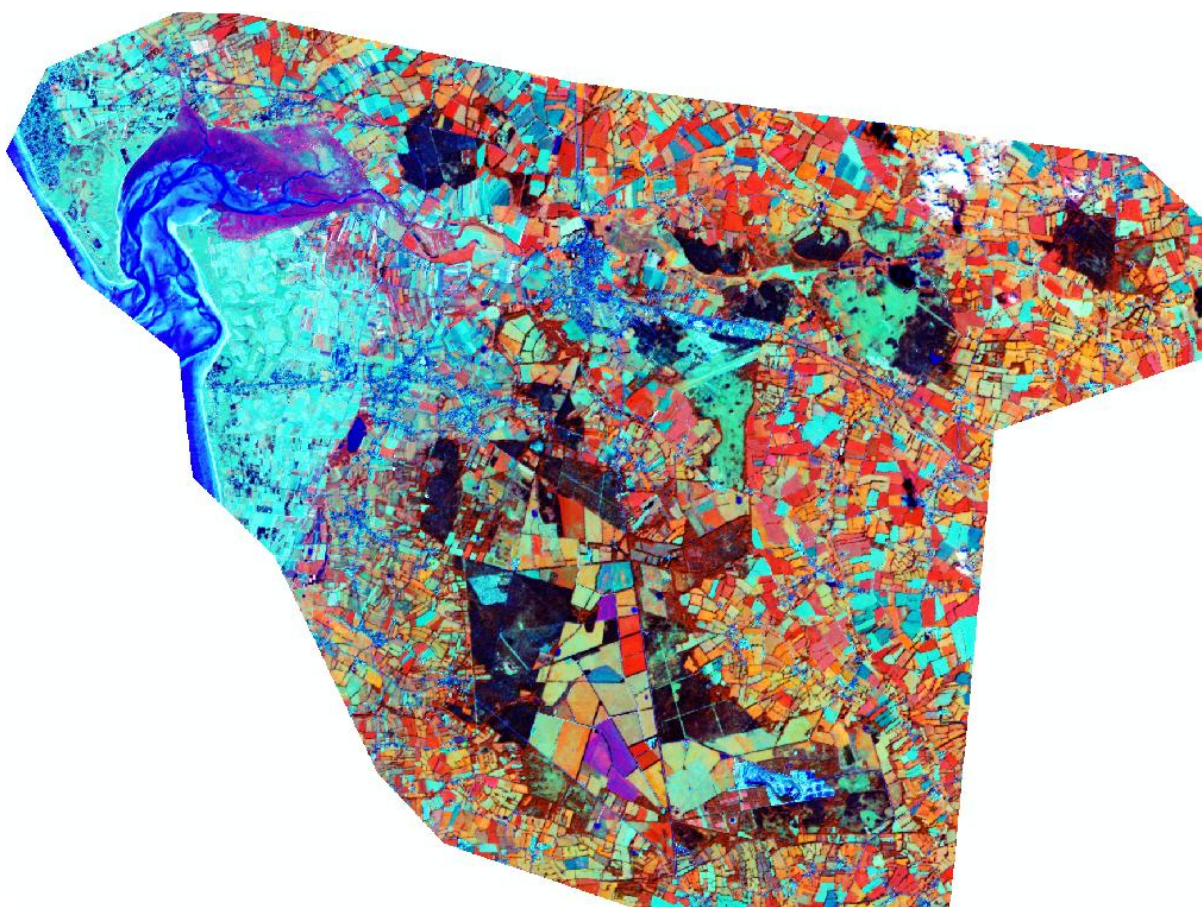


SPOT5

2.4 Havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay



BDORTHO® IRC



SPOT5

ANNEXE 3

Exemple d'images de texture dérivée des ortho-image et de Worldview-2 sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay



Extrait de l'image de texture (Homogeneity) dérivée de la BDORTHO IRC® sur la bande du PIR.



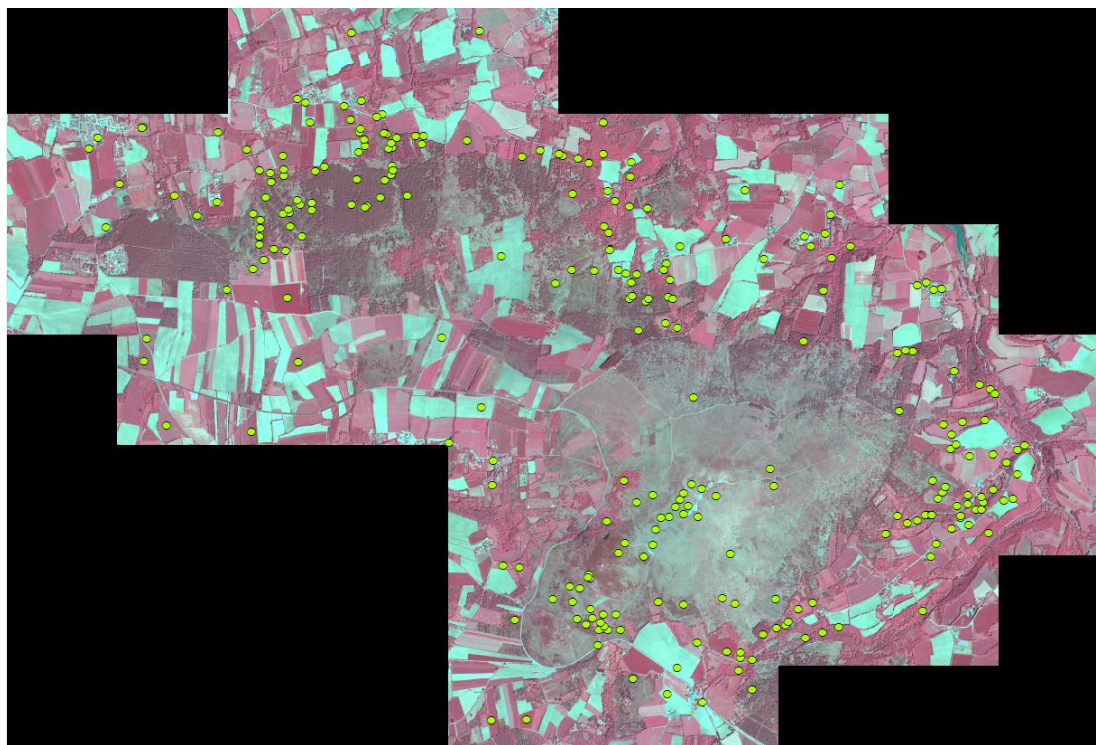
Extrait de l'image de texture (Second moment) dérivée de la BDORTHO IRC® sur la bande du PIR.



Extrait de l'image de texture (Dissimilarity) dérivée de l'image WorldView-2 sur la bande du PIR.

ANNEXE 4

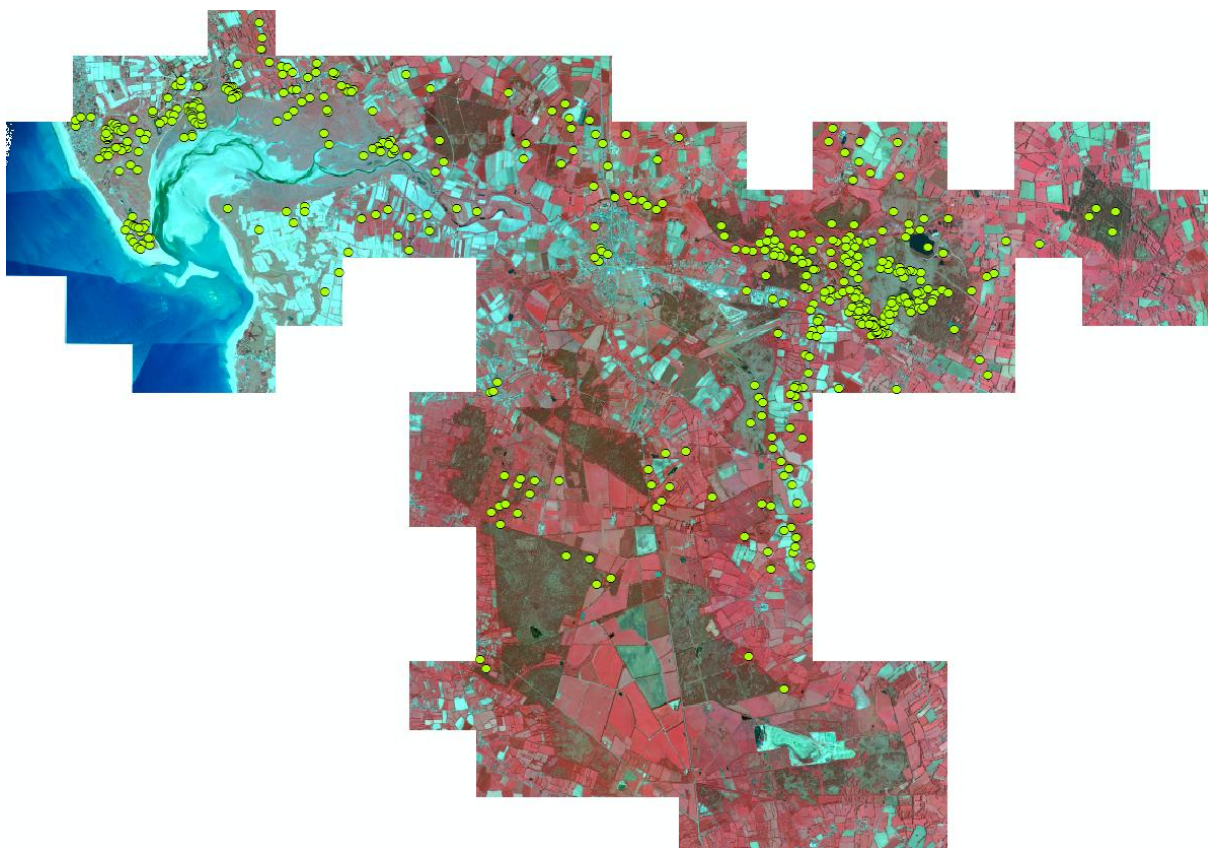
Localisation des points de validation par site



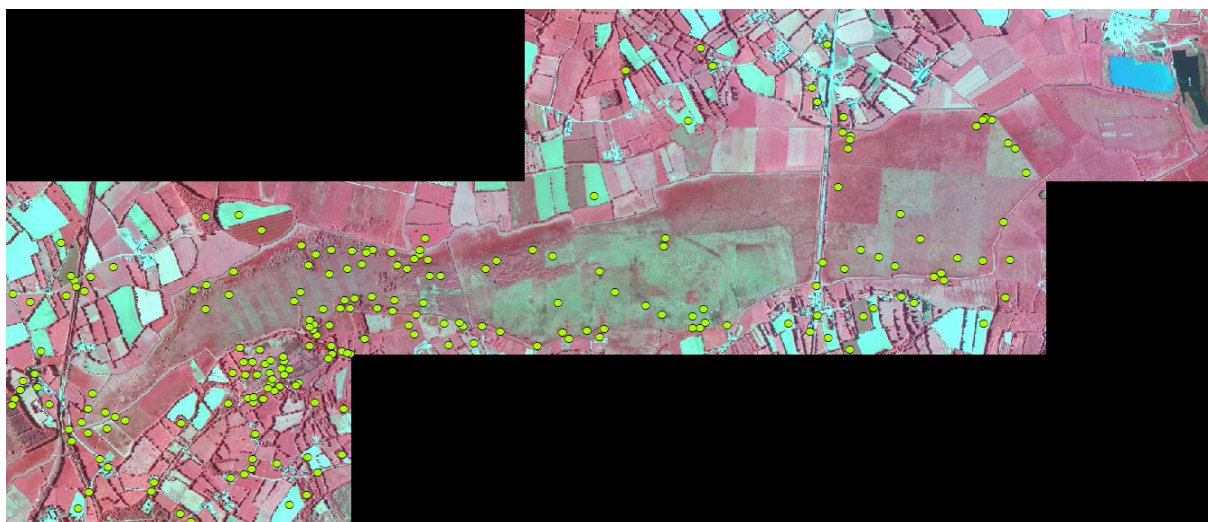
4.1 Complexe du Menez-Hom



4.2 Site des dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay



4.3 Havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay

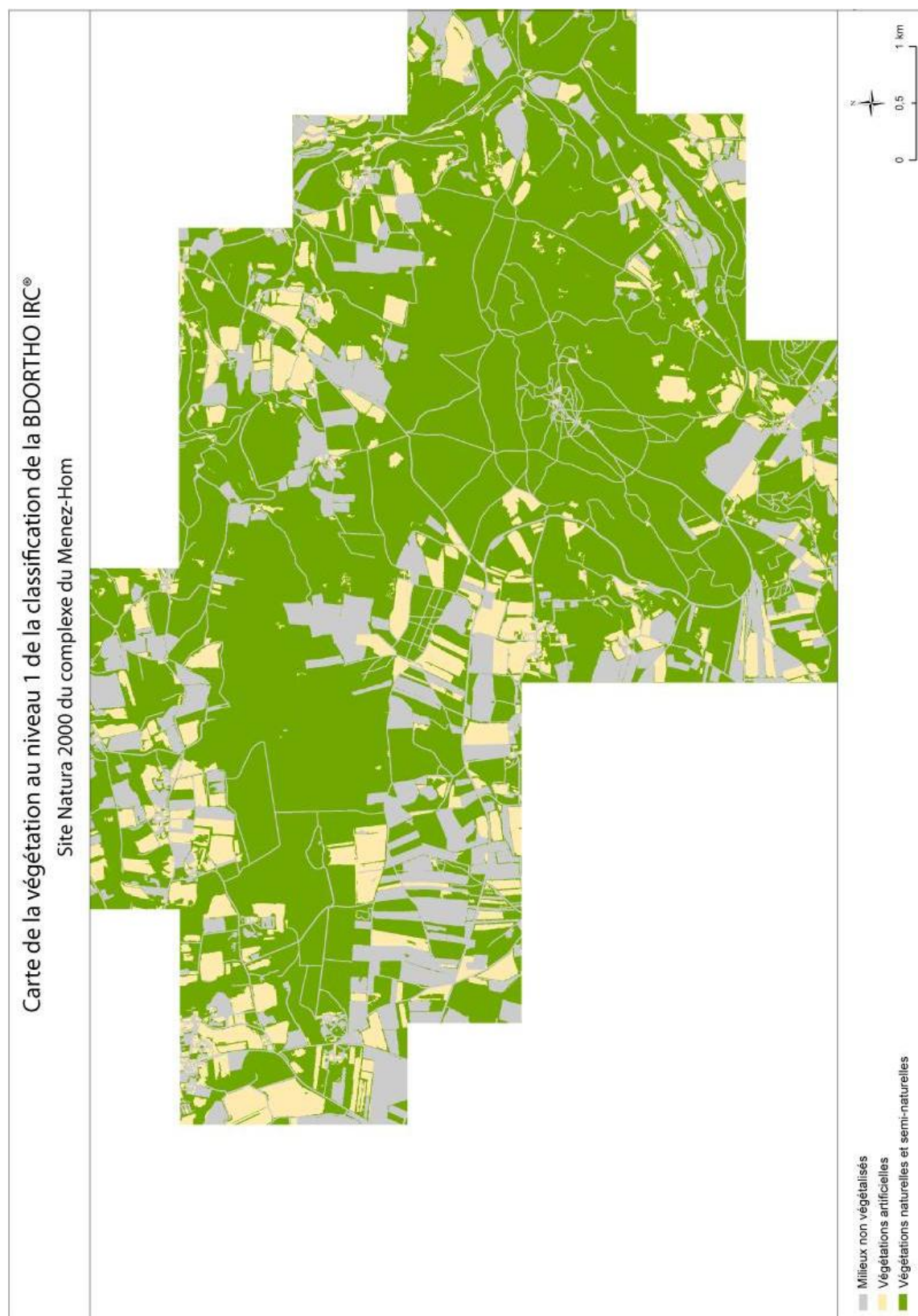


4.4 Marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie

ANNEXE 5

Cartographies et matrices de confusion du site « Complexe du Menez-Hom »

5.1 Niveau « Occupation du sol »



Précision totale : **0,87**

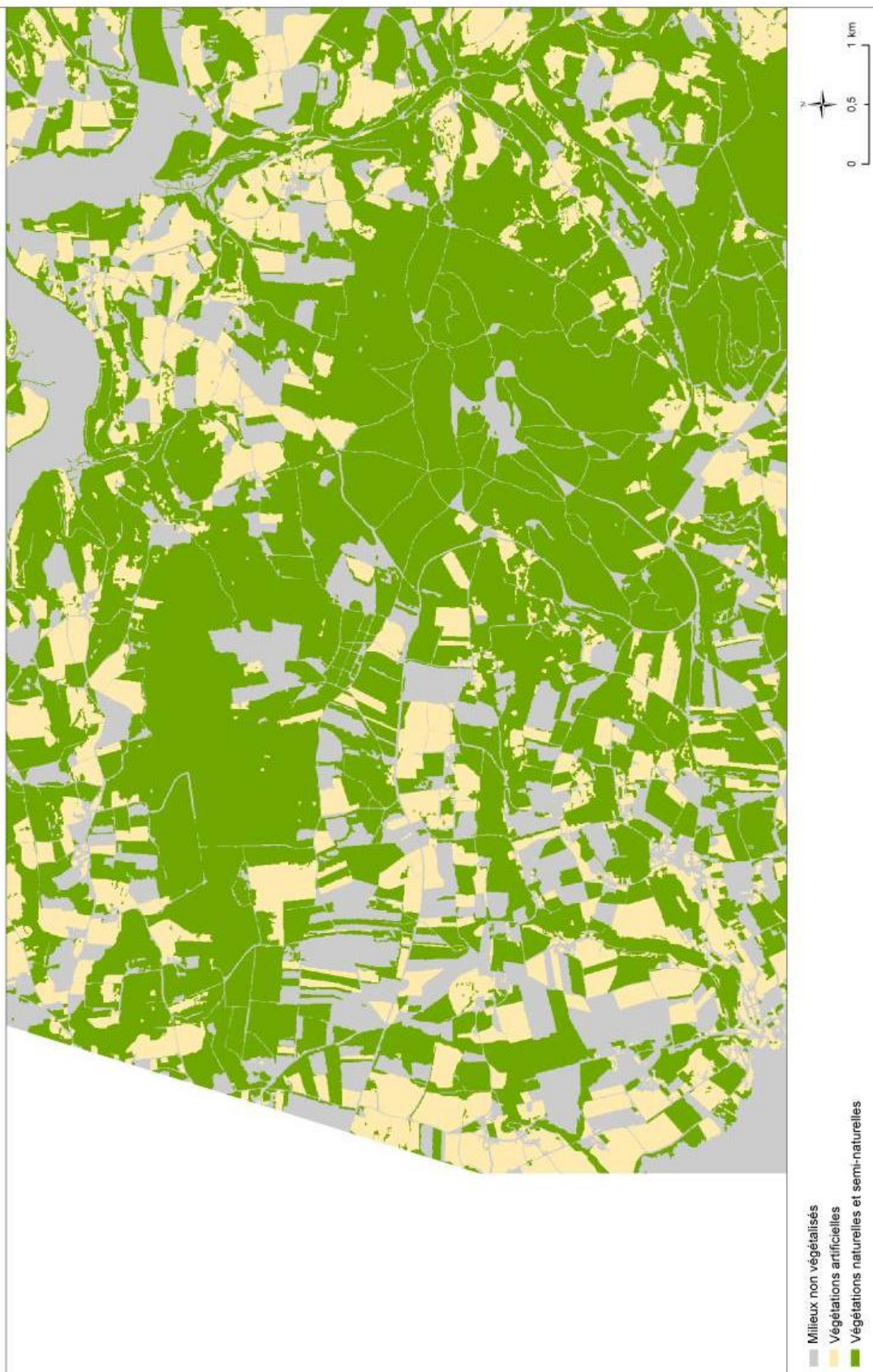
Kappa : **0,72**

	1	2	3	Total	Sous-détection (%)
Milieus non végétalisés (1)	37	1	1	39	5
Végétations artificielles (2)	3	23	8	34	32
Végétations naturelles et semi-naturelles (3)	2	19	160	181	12
Total	42	43	169	254	16
Sur-détection (%)	12	47	5	21	

Matrice de confusion issue du niveau 1 de la classification sur le site du Menez-Hom à partir de la BDORTHO® IRC

Carte de la végétation au niveau 1 de la classification de l'image SPOT5

Site Natura 2000 du complexe du Menez-Hom



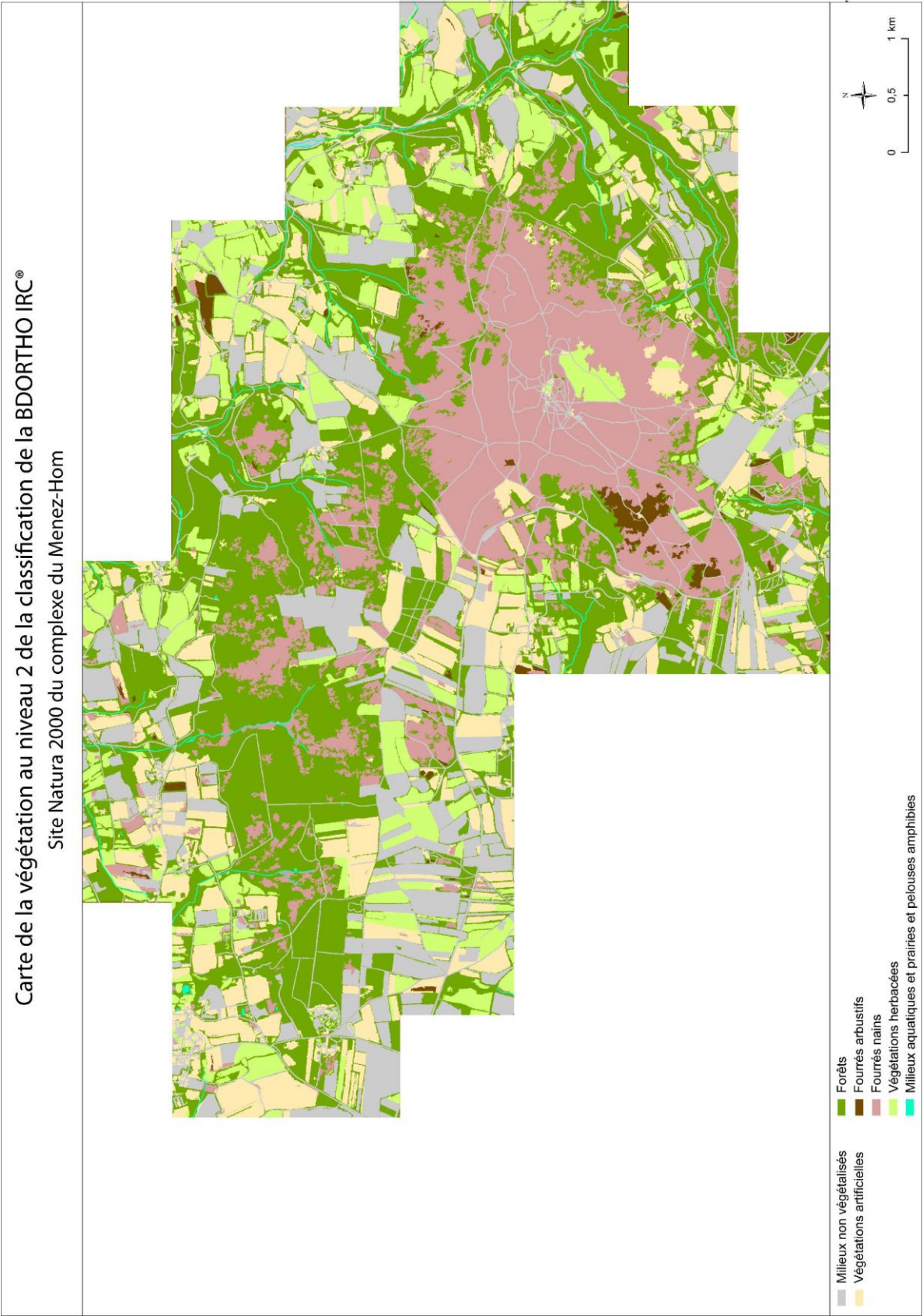
Précision totale : **0,79**

Kappa : **0,56**

	1	2	3	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	32	3	4	39	18
Végétations artificielles (2)	4	15	17	36	58
Végétations naturelles et semi-naturelles (3)	8	16	157	181	13
Total	44	34	178	256	30
Sur-détection (%)	27	56	12	32	

Matrice de confusion issue du niveau 1 de la classification sur le site du Menez-Hom à partir de l'image SPOT5

5.2 Niveau « Grands types de végétation »



Précision totale : **0,74**

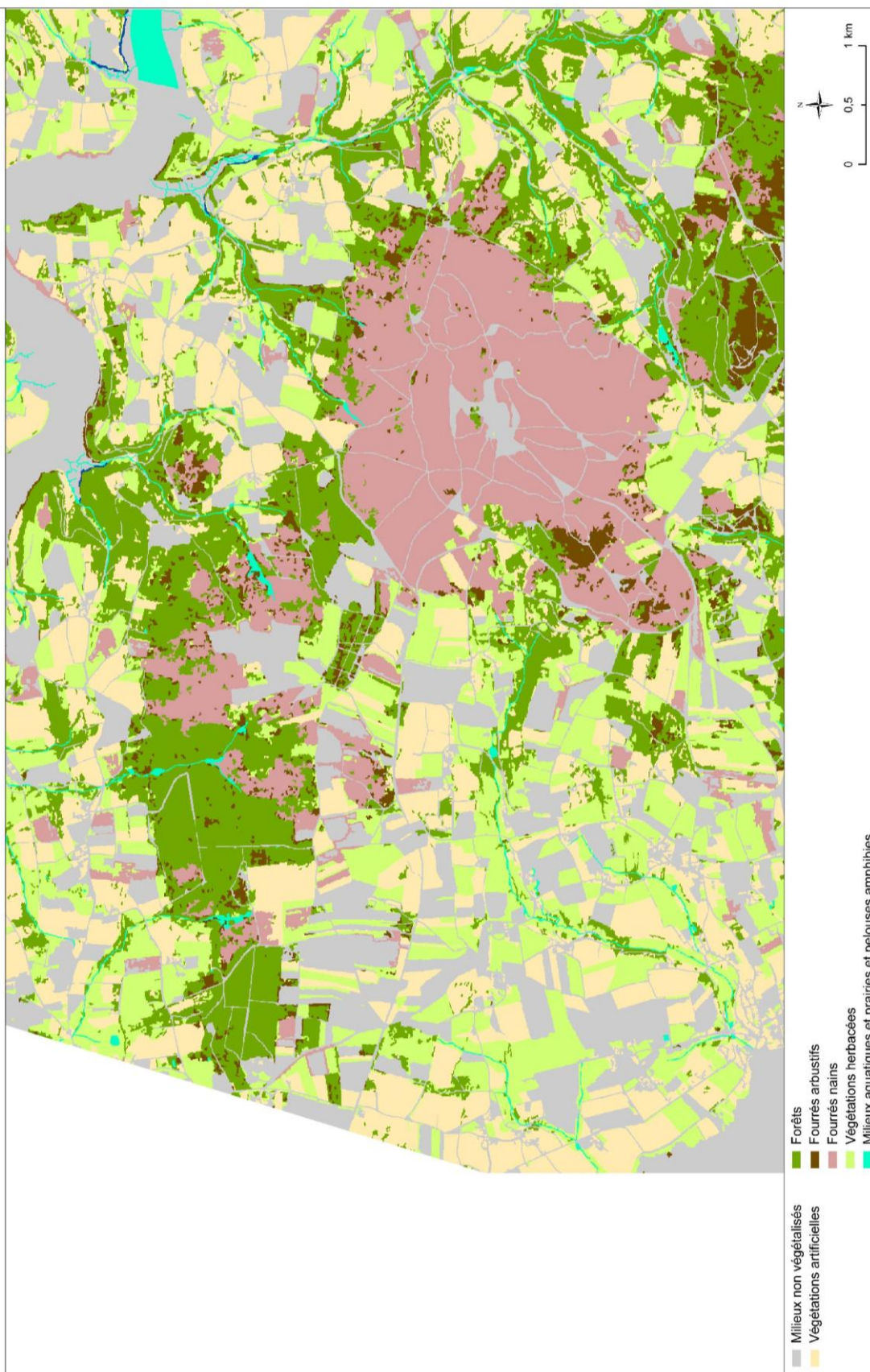
Kappa : **0,68**

	1	21	22	23	31	32	33	35	36	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	37			1			1			39	5
Cultures (21)	3	16				1	1	3		24	33
Plantations (22)			1		2					3	67
Parcs et jardins (23)			1	5	1					7	29
Forêts (31)	1				50					51	2
Fourrés arbustifs (32)					15	3	3			21	86
Fourrés nains (33)		1			5		44			50	12
Végétations herbacées (35)		18			7		1	17		43	61
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (36)	1				1				14	16	13
Total	42	35	2	6	81	4	50	20	14	254	34
Sur-détection (%)	12	54	50	17	38	25	12	15	0	25	

Matrice de confusion issue du niveau 2 de la classification sur le site du Menez-Hom à partir de la BDORTHO® IRC

Carte de la végétation au niveau 2 de la classification de l'image SPOT5

Site Natura 2000 du complexe du Menez-Hom



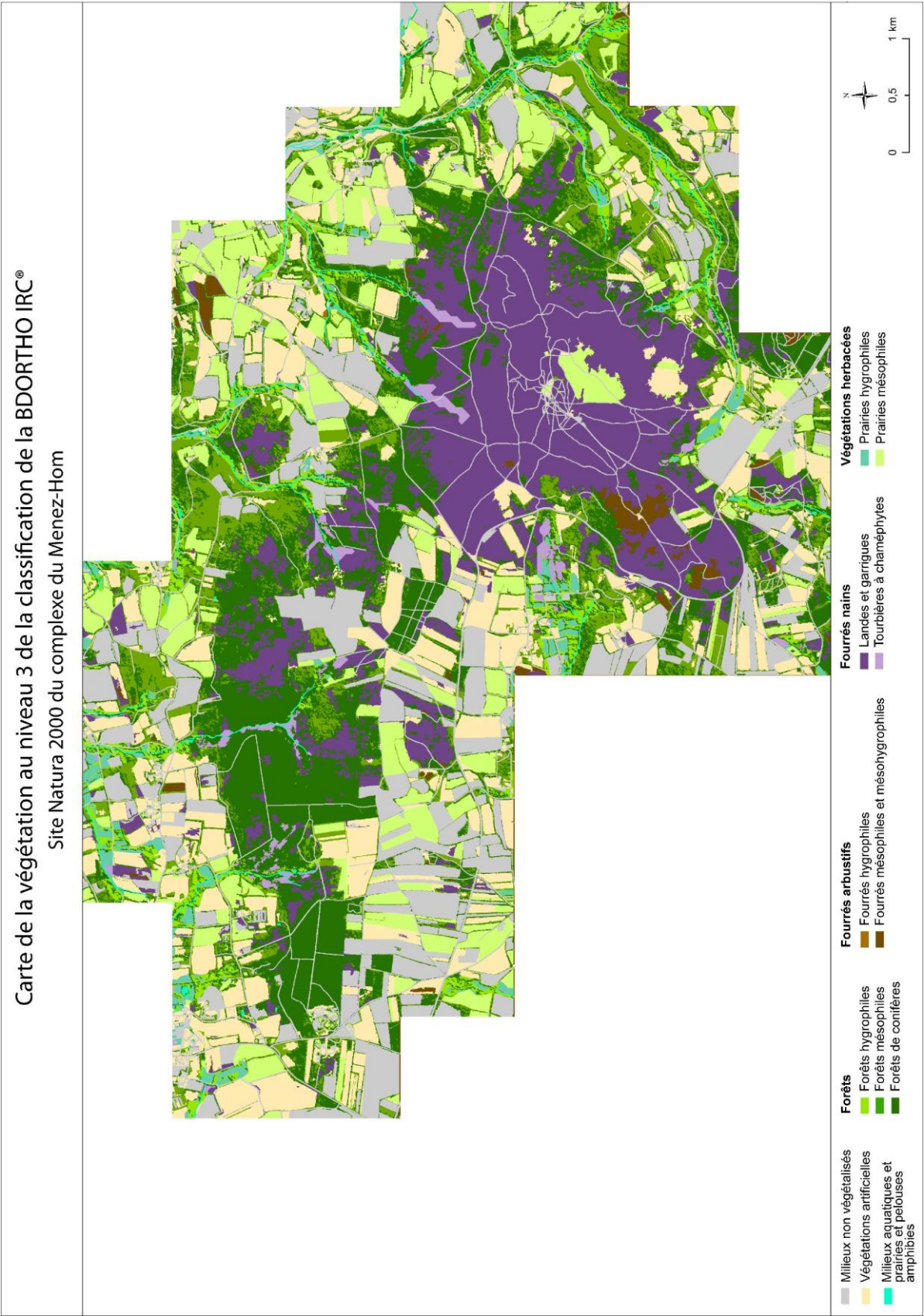
Précision totale : **0,62**

Kappa : **0,55**

	1	21	22	23	31	32	33	35	36	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	32	2		1				4		39	18
Cultures (21)	4	7			1		1	11		24	70
Plantations (22)			1		4					5	80
Parcs et jardins (23)		1	1	5						7	29
Forêts (31)	2	1			48		1	2		54	11
Fourrés arbustifs (32)		1			15	1	3		1	21	95
Fourrés nains (33)	2				6	3	34	2	2	49	31
Végétations herbacées (35)	4	14			5		1	20		44	55
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (36)					1		1		11	13	15
Total	44	26	2	6	80	4	41	39	14	256	45
Sur-détection (%)	27	73	50	17	40	75	17	49	21	41	

Matrice de confusion issue du niveau 2 de la classification sur le site du Menez-Hom à partir de l'image SPOT5

5.3 Niveau « Types de formations végétales »



Précision totale : **0,64**

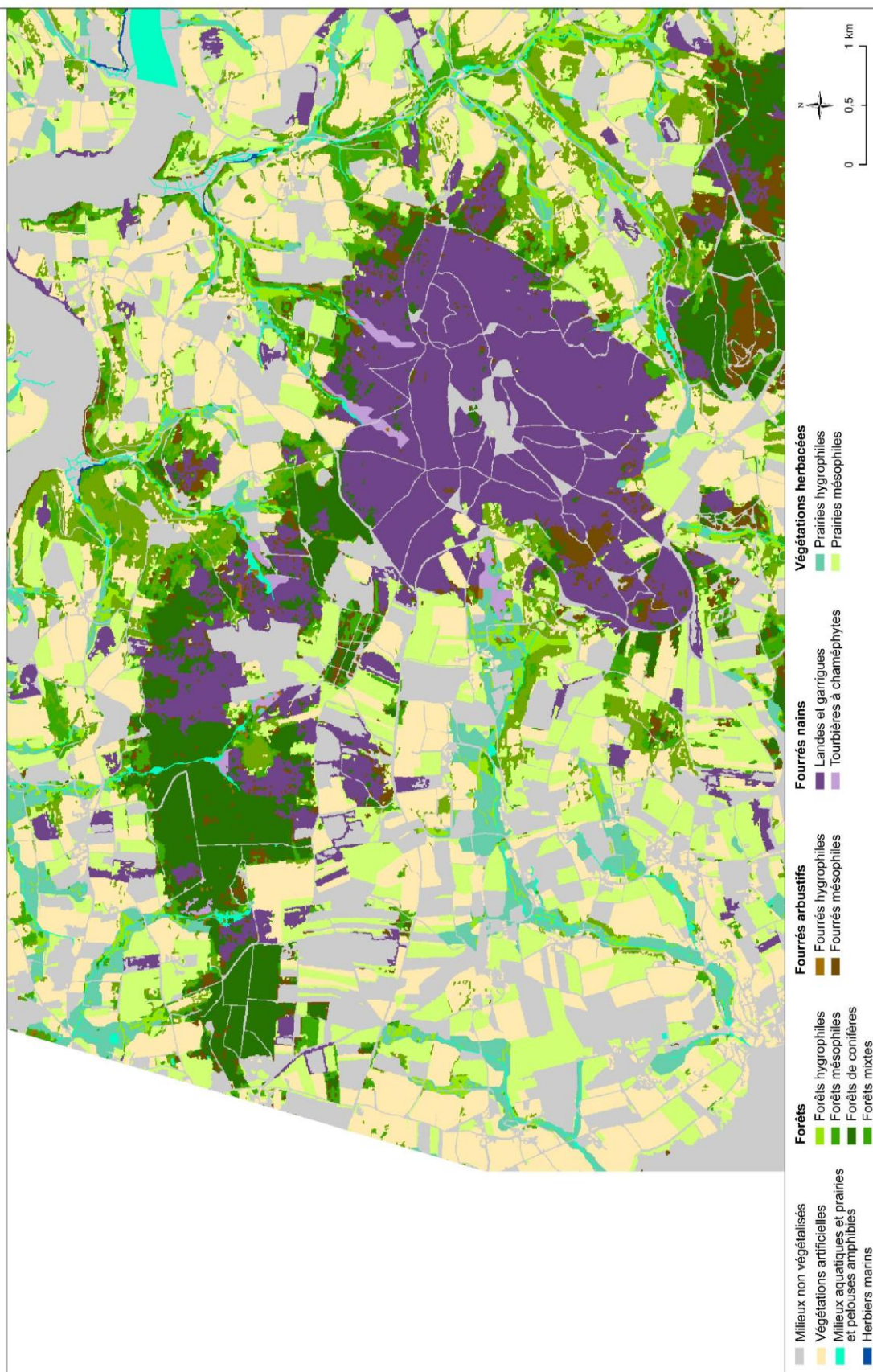
Kappa : **0,60**

	1	210	220	230	311	312	313	321	322	330	331	351	352	356	360	Total	Sous-détection (%)
Milieus non végétalisés (1)	37			1						1						39	5
Cultures (210)	3	16						1		1		3				24	33
Plantations (220)			1				2									3	67
Parcs et jardins (230)			1	5	1											7	29
Forêts mésophiles (311)					17	1	6									24	29
Forêts hygrophiles (312)					1	8	4									13	39
Forêts de conifères (313)	1						13									14	7
Fourrés mésophiles et mésohygrophiles (321)					3	2	1	2		3						11	82
Fourrés hygrophiles (322)					3	2	4	1	0							10	100
Landes et garrigues (330)		1					5			35	4					45	22
Tourbières à chaméphytes (331)										3	2					5	60
Prairies mésophiles (351)		13			2							5	2			22	77
Prairies hygrophiles (352)		2			1	2							9			14	36
Franges et lisières (356)		3			1	1				1			1	0		7	100
Milieus aquatiques et prairies et pelouses amphibies (360)	1						1								14	16	13
Total	42	35	2	6	29	16	36	4	0	44	6	8	12	0	14	254	47
Sur-détection (%)	12	54	50	17	41	50	64	50	100	21	67	37	25	100	0	46	

Matrice de confusion issue du niveau 3 de la classification sur le site du Menez-Hom à partir de la BDORTHO® IRC

Carte de la végétation au niveau 3 de la classification de l'image SPOT5

Site Natura 2000 du complexe du Menez-Hom



Précision totale : **0,56**

Kappa : **0,52**

	1	210	220	230	311	312	313	315	321	322	330	331	351	352	356	360	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	32	2		1									4				39	18
Cultures (210)	4	7			1						1		11				24	71
Plantations (220)			1					4									5	80
Parcs et jardins (230)		1	1	5													7	29
Forêts mésophiles (311)		1			19		1	2						1			24	20
Forêts hygrophiles (312)	1				1	8		2						1			13	39
Forêts de conifères (313)	1						11	1			1						14	22
Forêts mixtes (315)								3									3	0
Fourrés mésophiles et mésohygrophiles (321)		1			4	1		2	0		3						11	100
Fourrés hygrophiles (322)					3		1	4	1	0						1	10	100
Landes et garrigues (330)	2						4		2		31	2	2			2	45	31
Tourbières à chaméphytes (331)							2		1		1	0					4	100
Prairies mésophiles (351)	1	10			1								7	2			21	67
Prairies hygrophiles (352)	2	1			1	2							1	9			16	44
Franges et lisières (356)	1	3						1			1		1		0		7	100
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (360)							1					1				11	13	15
Total	44	26	2	6	30	11	20	19	4	0	38	3	26	13	0	14	256	52
Sur-détection (%)	27	73	50	17	37	27	45	84	100	100	18	100	73	31	100	21	57	

Matrice de confusion issue du niveau 3 de la classification sur le site du Menez-Hom à partir de l'image SPOT5

ANNEXE 6

Cartographies et matrices de confusion du site « Marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie »

6.1 Niveau « Occupation du sol »



Précision totale : **0,90**

Kappa : **0,78**

	1	2	3	Total	Sous-détection (%)
Milieus non végétalisés (1)	33	1		34	3
Végétations artificielles (2)	1	16	5	22	27
Végétations naturelles et semi-naturelles (3)		14	140	154	9
Total	34	31	145	210	13
Sur-détection (%)	3	48	4	18	

Matrice de confusion issue du niveau 1 de la classification sur le site des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie à partir de la BDORTHO® IRC

Carte de la végétation au niveau 1 de la classification de l'image SPOT5
Site de la réserve naturelle des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie



Milieux non végétalisés
 Végétations artificielles
 Végétations naturelles et semi-naturelles



0 0,5 1 km

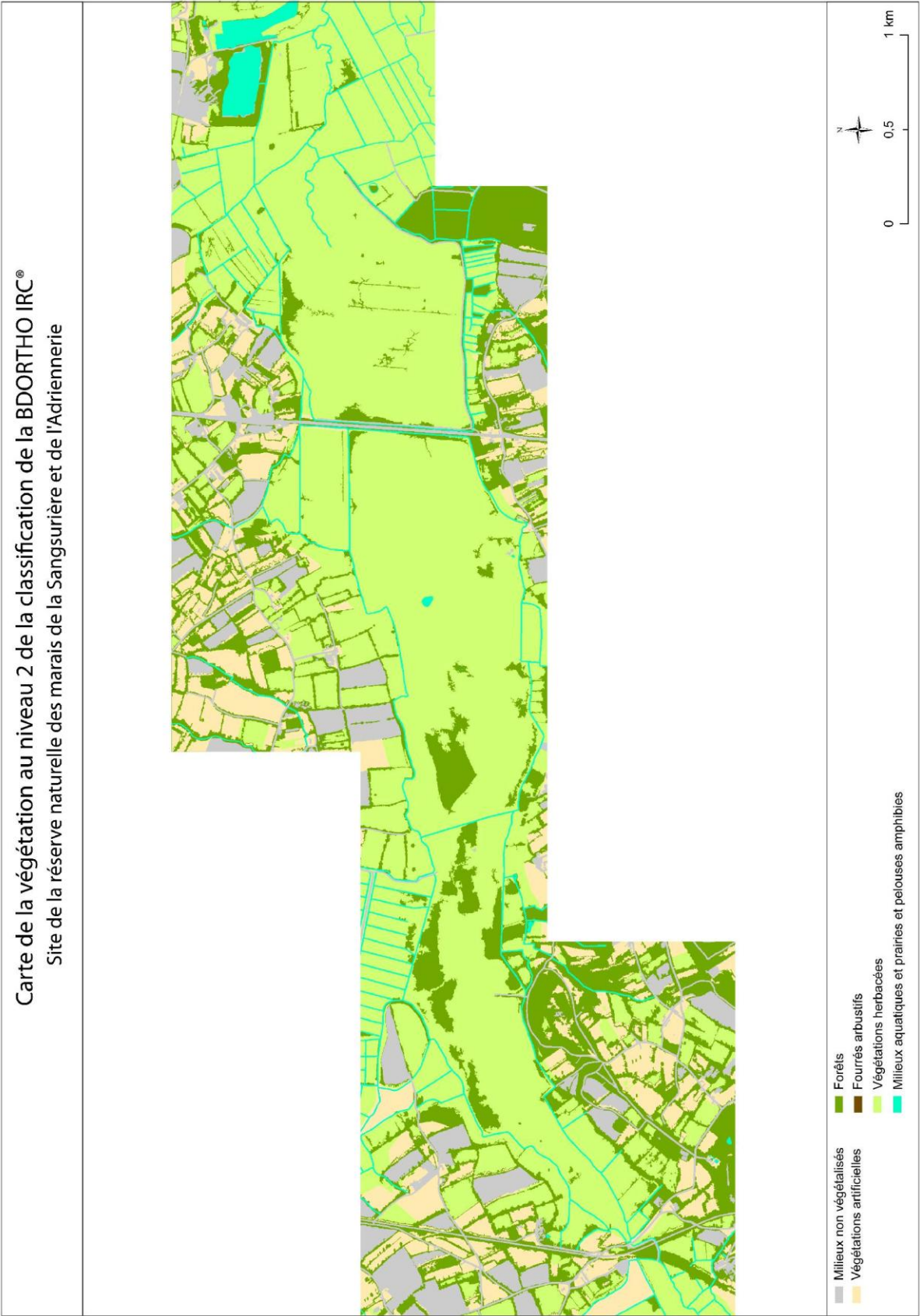
Précision totale : **0,89**

Kappa : **0,74**

	1	2	3	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	26	2	6	34	24
Végétations artificielles (2)	1	15	8	24	38
Végétations naturelles et semi-naturelles (3)	2	4	149	155	4
Total	29	21	163	213	21
Sur-détection (%)	10	29	9	16	

Matrice de confusion issue du niveau 1 de la classification sur le site des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie à partir de l'image SPOT5

6.2 Niveau « Grands types de végétations »



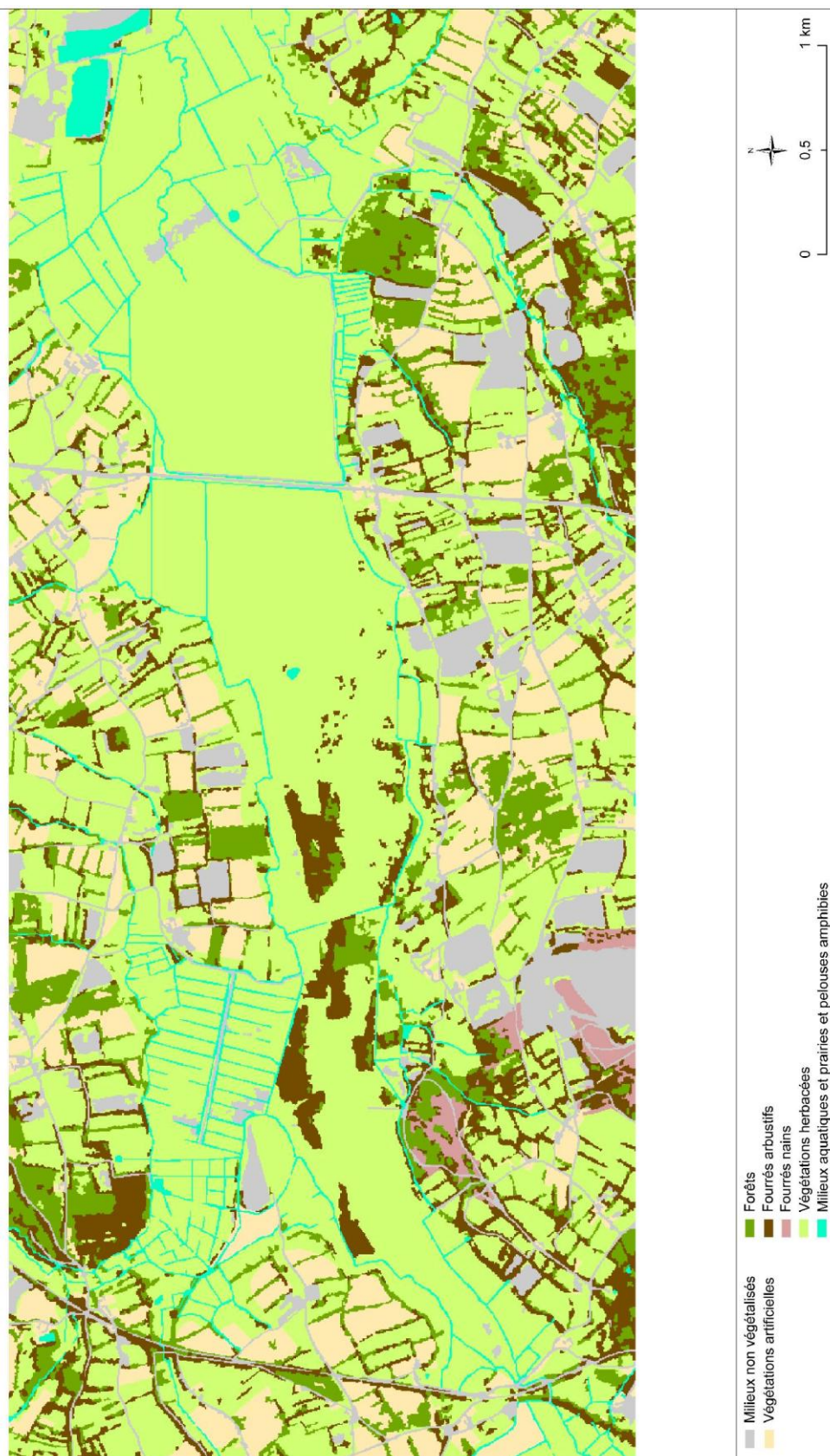
Précision totale : **0,69**

Kappa : **0,62**

	1	21	22	23	31	32	33	35	36	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	33			1						34	3
Cultures (21)	1	7						2		10	30
Plantations (22)			3		2					5	40
Parcs et jardins (23)				6				1		7	14
Forêts (31)					18					18	0
Fourrés arbustifs (32)					31	0		3		34	100
Fourrés nains (33)					3		0			3	100
Végétations herbacées (35)		13		1	4			62	1	81	24
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (36)					1				17	18	6
Total	34	20	3	8	59	0	0	68	18	210	35
Sur-détection (%)	3	65	0	25	70	100	100	9	6	42	

Matrice de confusion issue du niveau 2 de la classification sur le site des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie à partir de la BDORTHO® IRC

Carte de la végétation au niveau 2 de la classification de l'image SPOT5
Site de la réserve naturelle des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie



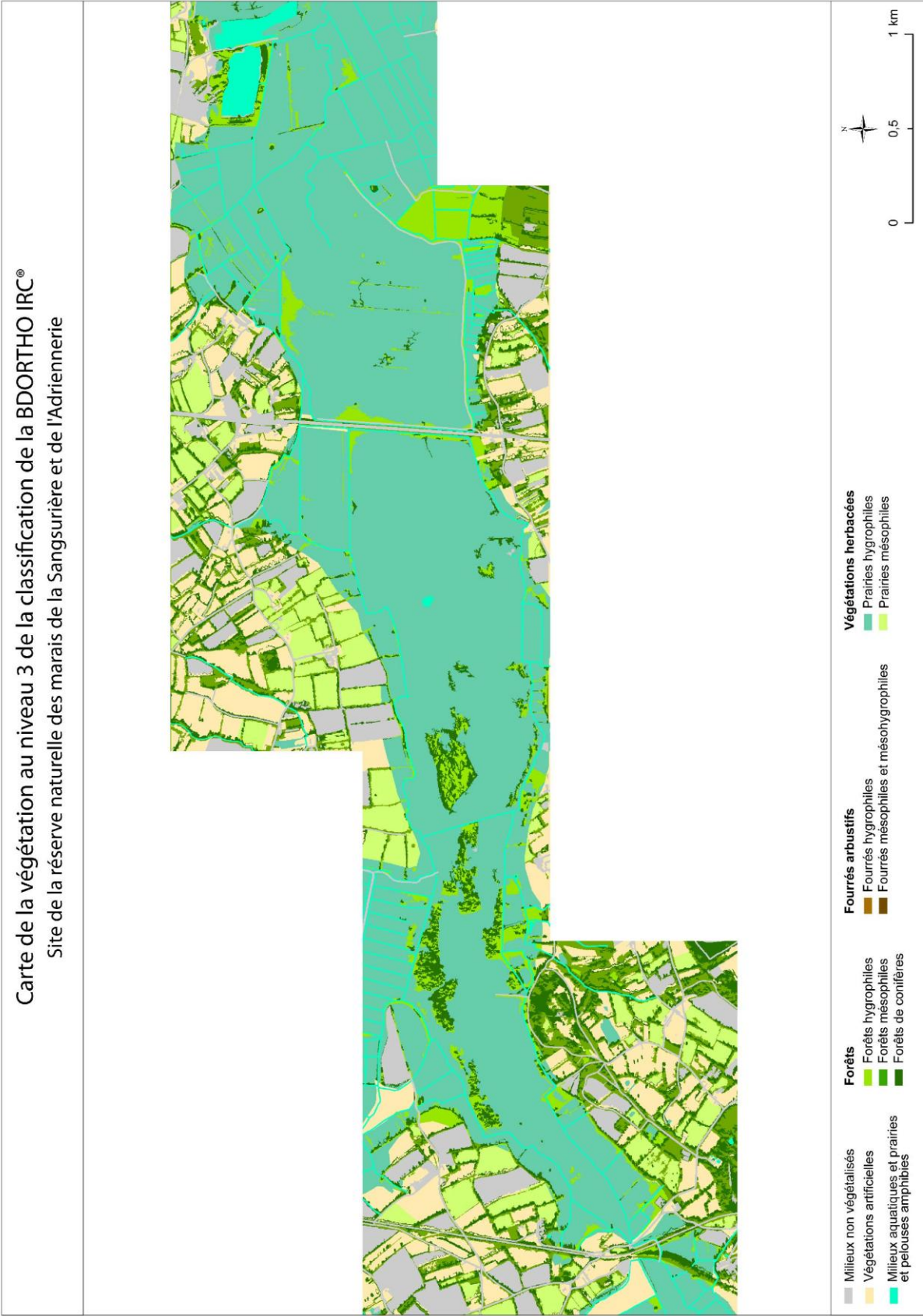
Précision totale : **0,75**

Kappa : **0,68**

	1	21	22	23	31	32	33	35	36	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	26	1		1				6		34	24
Cultures (21)	1	6			1			3		11	46
Plantations (22)			3					3		6	50
Parcs et jardins (23)				6		1				7	14
Forêts (31)					7	11				18	61
Fourrés arbustifs (32)					9	23	2			34	32
Fourrés nains (33)							3			3	0
Végétations herbacées (35)	2	3		1	3		3	69	1	82	16
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (36)								2	16	18	11
Total	29	10	3	8	20	35	8	83	17	213	28
Sur-détection (%)	10	40	0	25	65	34	62	17	6	29	

Matrice de confusion issue du niveau 2 de la classification sur le site des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie à partir de l'image SPOT5

6.3 Niveau « Types de formations végétales »



Précision totale : **0,64**

Kappa : **0,59**

	1	210	220	230	311	312	313	321	322	330	351	352	355	356	360	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	33			1												34	3
Cultures (210)	1	7									1	1				10	30
Plantations (220)			3		2											5	40
Parcs et jardins (230)				6							1					7	14
Forêts mésophiles (311)					9		2									11	18
Forêts hygrophiles (312)						5	2									7	29
Forêts de conifères (313)							0									0	100
Fourrés mésophiles et mésohygrophiles (321)					6		3	0								9	100
Fourrés hygrophiles (322)						12	10		0			3				25	100
Landes et garrigues (330)							3			0						3	100
Prairies mésophiles (351)		12		1	2						4	3				22	82
Prairies hygrophiles (352)												50			1	51	2
Roselières et cariçaies (355)												5	0			5	100
Franges et lisières (356)		1					2							0		3	100
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (360)							1								17	18	6
Total	34	20	3	8	19	17	23	0	0	0	6	62	0	0	18	210	55
Sur-détection (%)	3	65	0	25	53	71	100	100	100	100	33	19	100	100	6	58	

Matrice de confusion issue du niveau 3 de la classification sur le site des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie à partir de la BDORTHO® IRC



Précision totale : **0,71**

Kappa : **0,67**

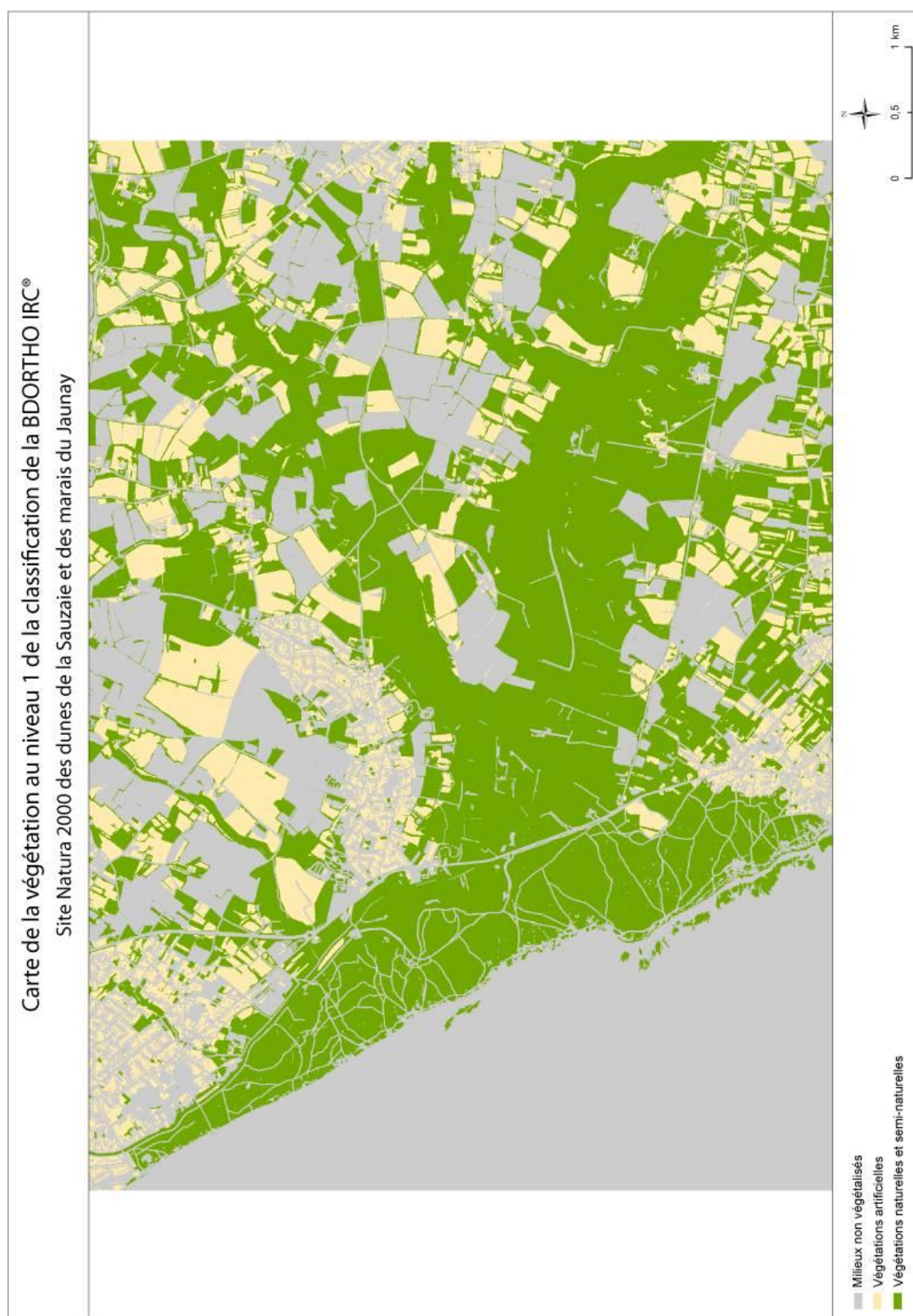
	1	210	220	230	311	312	321	322	330	351	352	355	356	360	Total	Sous-détection (%)
Milieus non végétalisés (1)	26	1		1						6					34	24
Cultures (210)	1	6			1					2	1				11	46
Plantations (220)			3							3					6	50
Parcs et jardins (230)				6			1								7	14
Forêts mésophiles (311)					4		6	1							11	63
Forêts hygrophiles (312)						3	1	3							7	57
Fourrés mésophiles et mésohygrophiles (321)					3		4		2						9	56
Fourrés hygrophiles (322)						6		19							25	24
Landes et garrigues (330)									3						3	0
Prairies mésophiles (351)		3		1					3	14	2				23	39
Prairies hygrophiles (352)	2										48			1	51	6
Roselières et cariçaies (355)											5	0			5	100
Franges et lisières (356)					3								0		3	100
Milieus aquatiques et prairies et pelouses amphibies (360)											2			16	18	11
Total	29	10	3	8	11	9	12	23	8	25	58	0	0	17	213	42
Sur-détection (%)	10	40	0	24	64	67	67	17	63	44	17	100	100	6	44	

Matrice de confusion issue du niveau 3 de la classification sur le site des marais de la Sangsurière et de l'Adriennerie à partir de l'image SPOT5

ANNEXE 7

Cartographies et matrices de confusion du site «Dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay»

7.1 Niveau « Occupation du sol »



Précision totale : **0,90**

Kappa : **0,81**

	1	2	3	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	39	2	2	43	9
Végétations artificielles (2)	3	29	5	37	22
Végétations naturelles et semi-naturelles (3)	3	8	153	164	7
Total	45	36	160	244	13
Sur-détection (%)	13	20	4	14	

Matrice de confusion issue du niveau 1 de la classification sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay à partir de la BDORTHO® IRC

Carte de la végétation au niveau 1 de la classification de l'image SPOT5

Site Natura 2000 des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay



Milieux non végétalisés
Végétations artificielles
Végétations naturelles et semi-naturelles



Précision totale : **0,84**

Kappa : **0,63**

	1	2	3	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	21	9	6	36	42
Végétations artificielles (2)		21	16	37	43
Végétations naturelles et semi-naturelles (3)	3	4	158	165	4
Total	24	34	180	238	30
Sur-détection (%)	13	38	12	21	

Matrice de confusion issue du niveau 1 de la classification sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay à partir de l'image SPOT5

Carte de la végétation au niveau 1 de la classification de l'image Worldview-2

Site Natura 2000 des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay



■ Milieux non végétalisés
 ■ Végétations artificielles
 ■ Végétations naturelles et semi-naturelles



Précision totale : **0,95**

Kappa : **0,90**

	1	2	3	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	47			47	0
Végétations artificielles (2)	1	28	8	37	24
Végétations naturelles et semi-naturelles (3)	2	1	156	159	2
Total	50	29	164	243	9
Sur-détection (%)	6	3	5	5	

Matrice de confusion issue du niveau 1 de la classification sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay (image multispectrale) à partir de l'image Worldview-2

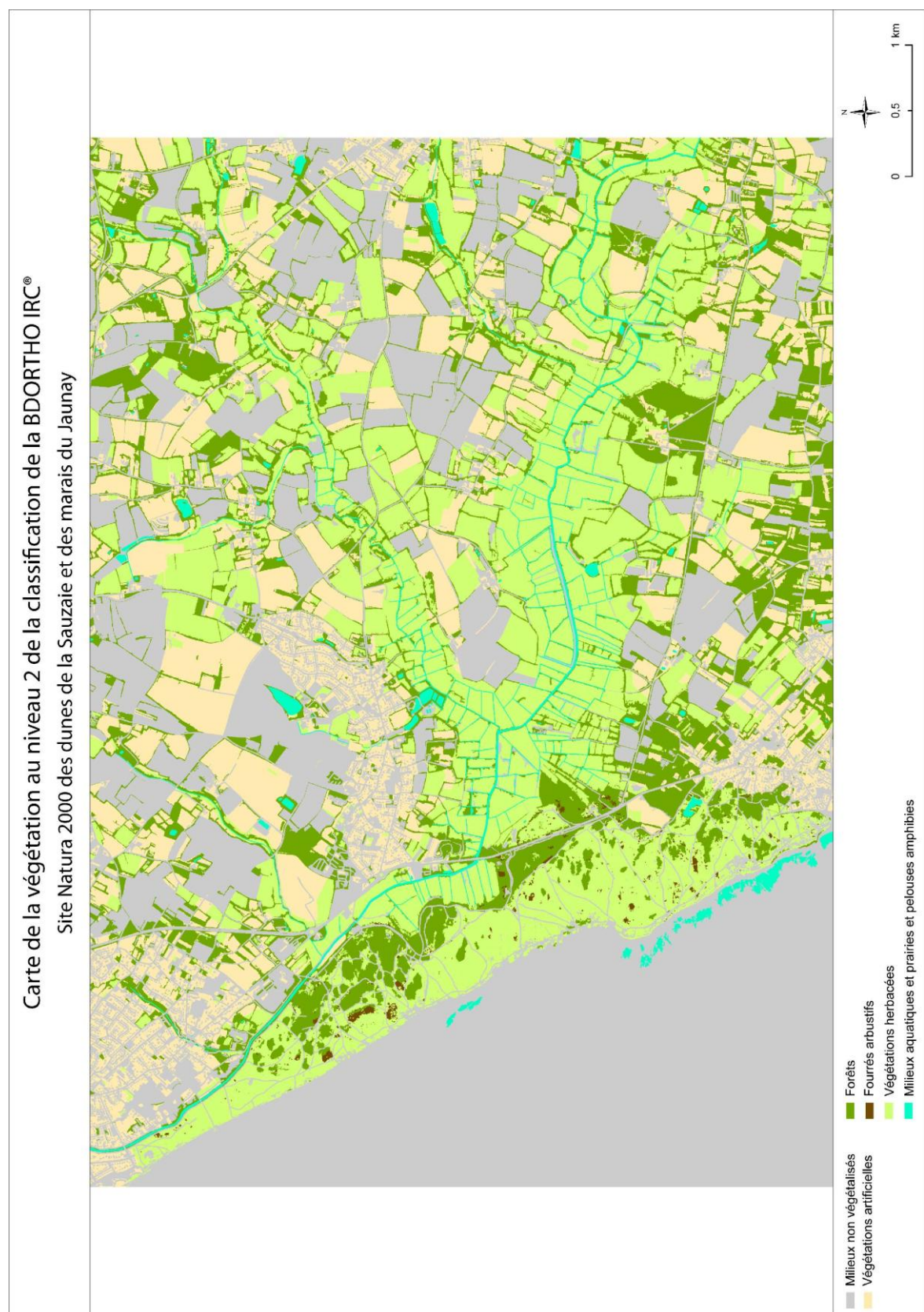
Précision totale : **0,94**

Kappa : **0,88**

	1	2	3	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	45	2		47	4
Végétations artificielles (2)	1	27	9	37	27
Végétations naturelles et semi-naturelles (3)	1	2	156	159	2
Total	47	31	165	243	11
Sur-détection (%)	4	13	5	7	

Matrice de confusion issue du niveau 1 de la classification sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay (image fusionnée) à partir de l'image Worldview-2

7.2 Niveau « Grands types de végétations »



Précision totale : **0,81**

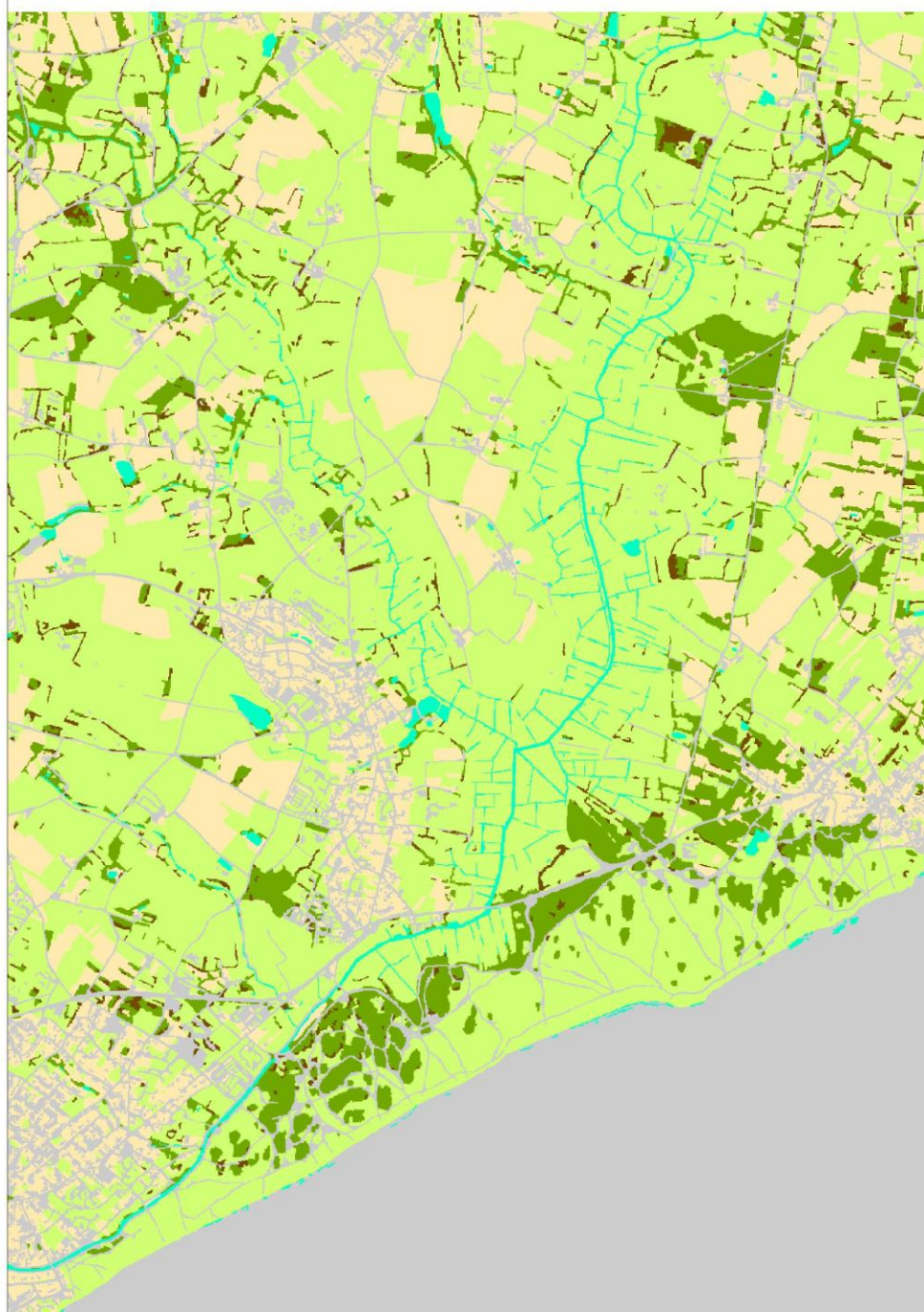
Kappa : **0,77**

	1	21	22	23	31	32	34	35	36	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	39	1		1				2		43	9
Cultures (21)	3	16						2		21	24
Plantations (22)			4		2					6	33
Parcs et jardins (23)				9				1		10	10
Forêts (31)					35	4			1	40	13
Fourrés arbustifs (32)					14	9		2		25	64
Végétations aquatiques (34)							4			4	0
Végétations herbacées (35)	2	8			1			75		86	13
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (36)	1								8	9	11
Total	45	25	4	10	52	13	4	82	9	244	20
Sur-détection (%)	13	36	0	10	33	31	0	9	11	16	

Matrice de confusion issue du niveau 2 de la classification sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay à partir de la BDORTHO® IRC

Carte de la végétation au niveau 2 de la classification de l'image SPOT5

Site Natura 2000 des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay



- Milieux non végétalisés
- Végétations artificielles
- Forêts
- Fourrés arbustifs
- Végétations herbacées
- Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies



0 0.5 1 km

Précision totale : **0,73**

Kappa : **0,64**

	1	21	22	23	31	32	34	35	36	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	21	7		2				6		36	42
Cultures (21)		7						14		21	67
Plantations (22)			4		2					6	33
Parcs et jardins (23)				10						10	0
Forêts (31)					39	1				40	3
Fourrés arbustifs (32)		1			21	1		2		25	96
Végétations aquatiques (34)	2						2			4	50
Végétations herbacées (35)	1	3			2			81		87	7
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (36)								1	8	9	11
Total	24	18	4	12	64	2	2	104	8	238	34
Sur-détection (%)	13	61	0	17	39	50	0	22	0	23	

Matrice de confusion issue du niveau 2 de la classification sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay à partir de l'image SPOT5

Carte de la végétation au niveau 2 de la classification de l'image Worldview-2

Site Natura 2000 des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay



- Milieux non végétalisés
- Végétations artificielles
- Forêts
- Fourrés arbustifs
- Végétations herbacées
- Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies



0 0,5 1 km

Précision totale : **0,88**

Kappa : **0,85**

	1	21	22	23	31	32	35	36	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	47								47	0
Cultures (21)	1	15				1	4		21	29
Plantations (22)			4		2				6	33
Parcs et jardins (23)				9			1		10	10
Forêts (31)			1		32	4	2	1	40	20
Fourrés arbustifs (32)					8	16	1		25	36
Végétations herbacées (35)						1	82		85	4
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (36)								9	9	0
Total	50	15	5	9	42	22	90	10	243	17
Sur-détection (%)	6	0	20	0	24	27	9	10	12	

Matrice de confusion issue du niveau 2 de la classification sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay (image multispectrale) à partir de l'image Worldview-2

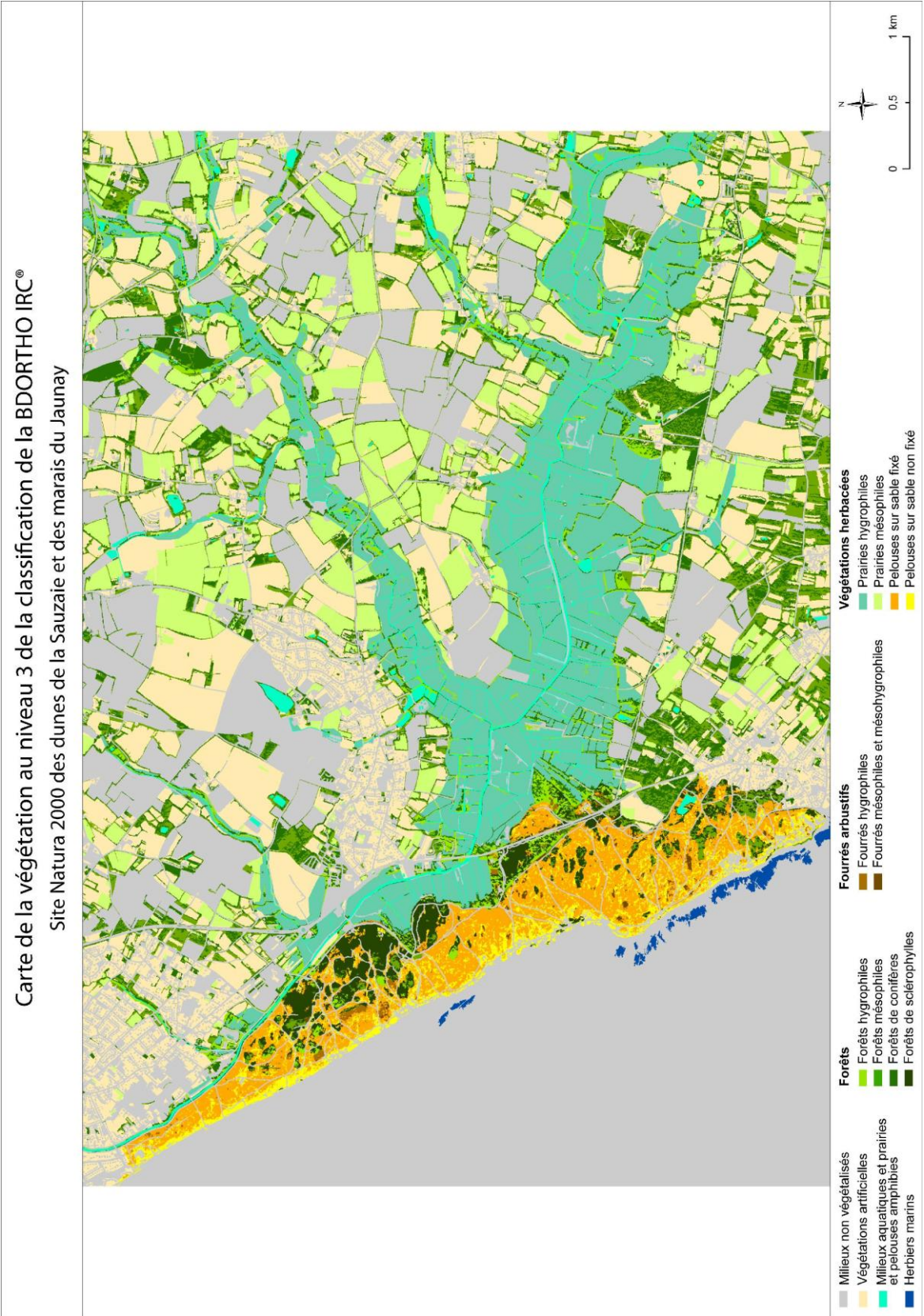
Précision totale : **0,86**

Kappa : **0,82**

	1	21	22	23	31	32	35	36	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	45		2						47	4
Cultures (21)	1	16					4		21	24
Plantations (22)			7				3		10	30
Parcs et jardins (23)				4	1	1			6	33
Forêts (31)		1		1	30	6	1	1	40	25
Fourrés arbustifs (32)					4	15	6		25	40
Végétations herbacées (35)	1				1	1	82		85	4
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (36)								9	9	0
Total	47	17	9	5	36	23	96	10	243	20
Sur-détection (%)	4	6	22	20	17	35	15	10	16	

Matrice de confusion issue du niveau 2 de la classification sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay (image fusionnée) à partir de l'image Worldview-2

7.3 Niveau « Types de formations végétales »



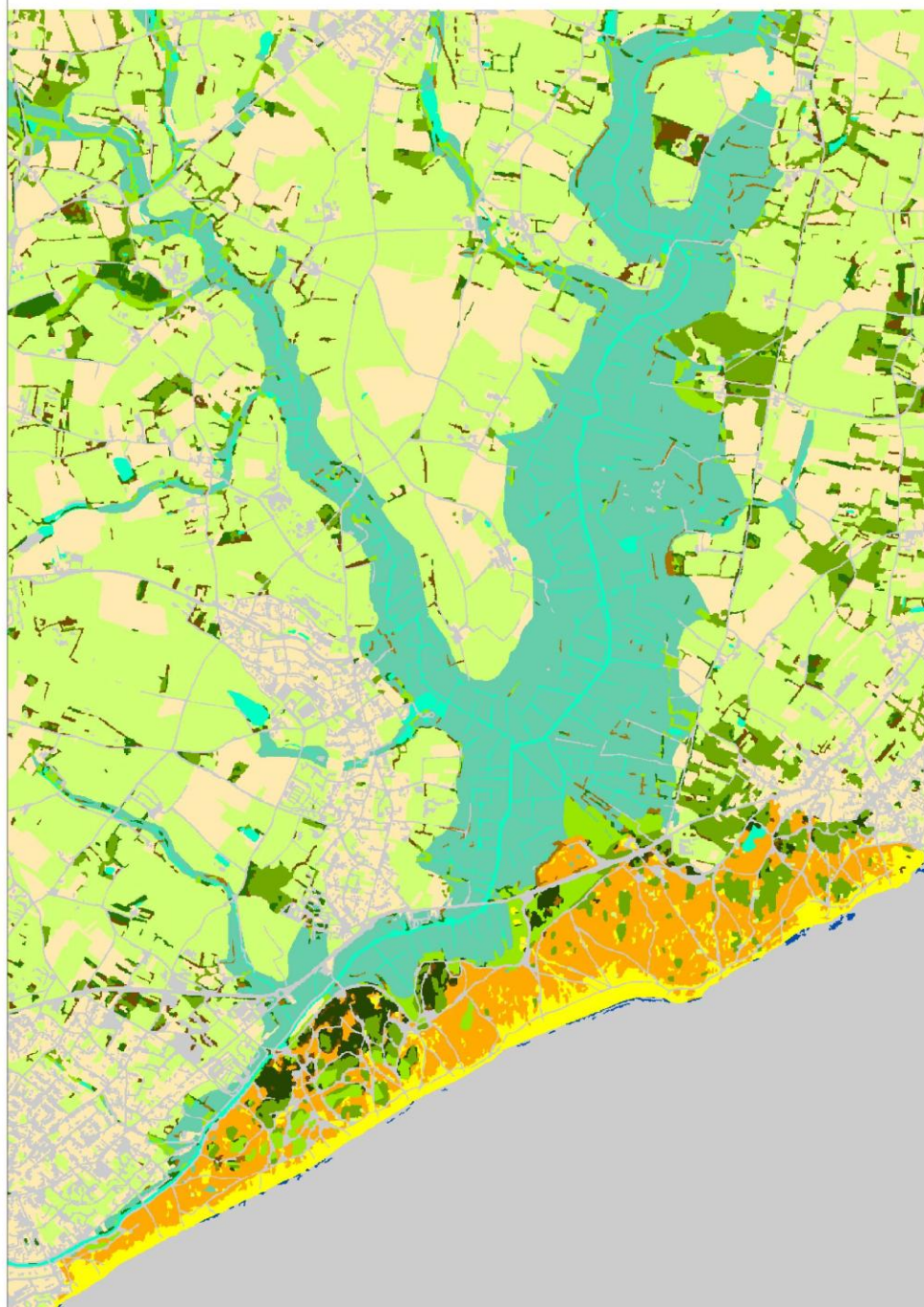
Précision totale : **0,74**

Kappa : **0,71**

	1	210	220	230	311	312	313	314	321	322	340	351	352	353	354	355	360	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	39	1		1								2						43	9
Cultures (210)	3	16										1	1					21	24
Plantations (220)			4				2											6	33
Parcs et jardins (230)				9								1						10	10
Forêts mésophiles (311)					7	1		1	1	2							1	13	46
Forêts hygrophiles (312)					1	6		2										9	33
Forêts de conifères (313)							6	1										7	14
Forêts de sclérophylles (314)								10	1									11	9
Fourrés mésophiles et mésohygrophiles (321)					8			2	5	3					2			20	75
Fourrés hygrophiles (322)						3	1			1								5	80
Herbiers marins (340)											4							4	0
Prairies mésophiles (351)		8										7	6		1			22	68
Prairies hygrophiles (352)													23					23	0
Pelouses sur sable non fixé (353)	2													14				16	13
Pelouses sur sable fixé (354)														1	21			22	5
Roselières et cariçaies (355)								1					2			0		3	100
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (360)	1																8	9	11
Total	45	25	4	10	16	10	9	17	7	6	4	11	32	15	24	0	9	244	31
Sur-détection (%)	13	36	0	10	56	40	33	41	29	83	0	36	28	7	13	100	11	32	

Matrice de confusion issue du niveau 3 de la classification sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay à partir de la BDORTHO® IRC

Carte de la végétation au niveau 3 de la classification de l'image SPOT5
Site Natura 2000 des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay



- | | | | |
|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| Milieux non végétalisés | Forêts | Fourrés arbustifs | Végétations herbacées |
| Végétations artificielles | Forêts hygrophiles | Fourrés hygrophiles | Prairies hygrophiles |
| Milieux aquatiques et prairies | Forêts mésophiles | Fourrés mésophiles et mésohygrophiles | Prairies mésophiles |
| et pelouses amphibies | Forêts de conifères | | Pelouses sur sable fixé |
| Herbiers marins | Forêts de sclérophylles | | Pelouses sur sable non fixé |



0 0.5 1 km

Précision totale : **0,63**

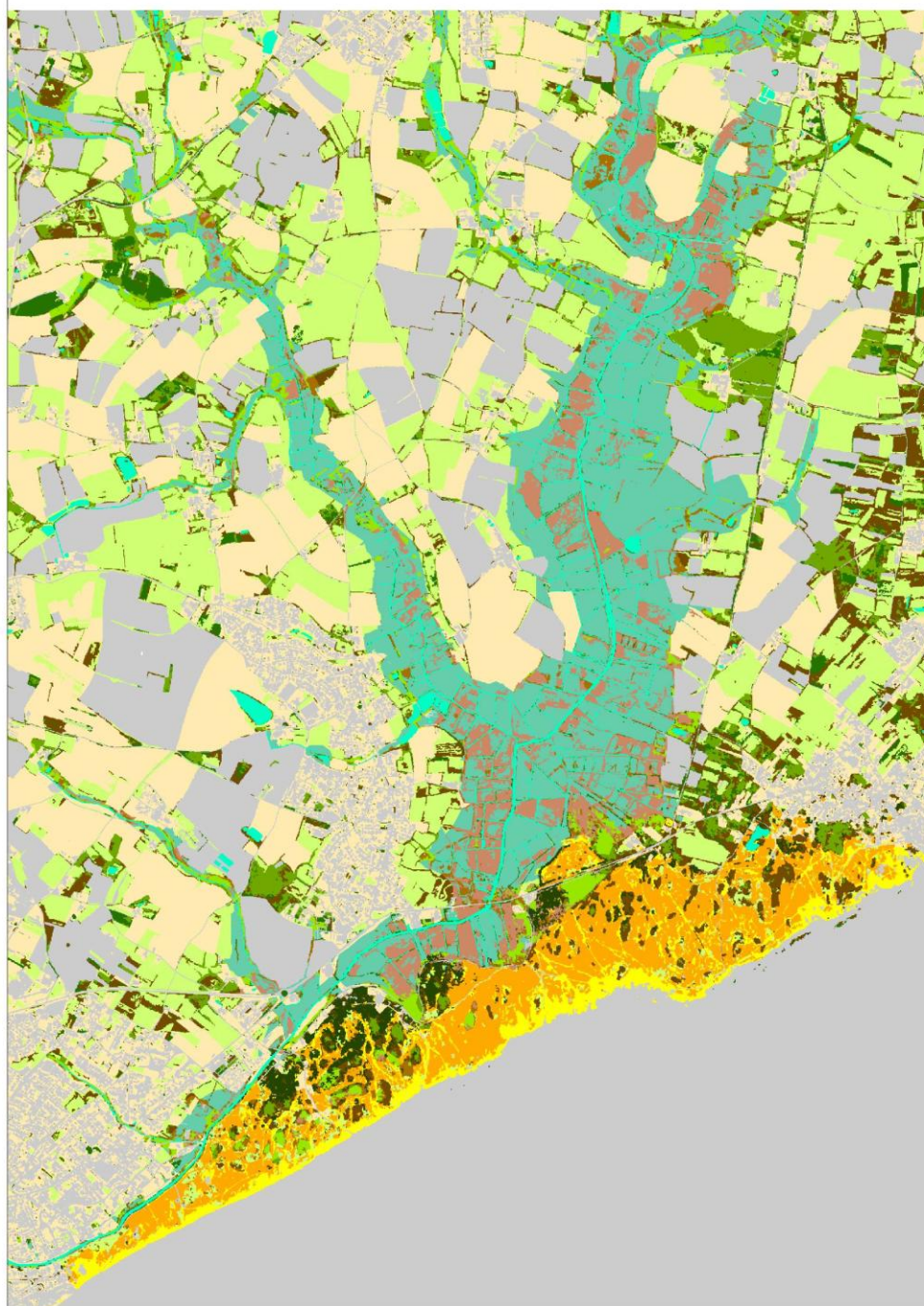
Kappa : **0,60**

	1	210	220	230	311	312	313	314	321	322	340	351	352	353	354	355	360	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	21	7		2								5	1					36	42
Cultures (210)		7										13	1					21	67
Plantations (220)			4			2												6	33
Parcs et jardins (230)				10														10	0
Forêts mésophiles (311)					8	5												13	39
Forêts hygrophiles (312)					2	6	1											9	33
Forêts de conifères (313)							6		1									7	14
Forêts de sclérophylles (314)					4	1		6										11	46
Fourrés mésophiles et mésohygrophiles (321)		1			13	4			1						1			20	95
Fourrés hygrophiles (322)						4				0			1					5	100
Herbiers marins (340)	2										2							4	50
Prairies mésophiles (351)		3				1						11	8					23	52
Prairies hygrophiles (352)													23					23	0
Pelouses sur sable non fixé (353)	1													15				16	6
Pelouses sur sable fixé (354)															22			22	0
Roselières et cariçaies (355)						1							2			0		3	100
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (360)													1				8	9	11
Total	24	18	4	12	27	24	7	6	2	0	2	29	37	15	23	0	8	238	41
Sur-détection (%)	13	61	0	17	70	75	14	0	50	100	0	62	38	0	4	100	0	36	

Matrice de confusion issue du niveau 3 de la classification sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay à partir de l'image SPOT5

Carte de la végétation au niveau 3 de la classification de l'image Worldview-2

Site Natura 2000 des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay



Précision totale : **0,76**

Kappa : **0,74**

	1	210	220	230	311	312	313	314	321	322	351	352	353	354	356	360	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	47																47	0
Cultures (210)	1	15							1		4						21	29
Plantations (220)			4														6	33
Parcs et jardins (230)				9		2					1						10	10
Forêts mésophiles (311)					5	4		1	1							1	13	62
Forêts hygrophiles (312)					1	5			1		1				1		9	44
Forêts de conifères (313)			1				6	1									7	14
Forêts de sclérophylles (314)					1			8	2								11	27
Fourrés mésophiles et mésohygrophiles (321)					1	1		3	14	1							20	30
Fourrés hygrophiles (322)						3				1					1		5	80
Prairies mésophiles (351)										1	12	4		1	3		21	43
Prairies hygrophiles (352)												12			11		23	48
Pelouses sur sable non fixé (353)	1												15				16	6
Pelouses sur sable fixé (354)	1										1			20			22	9
Roselières et cariçaies (355)															3		3	0
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (360)																9	9	0
Total	50	15	5	9	8	15	6	13	19	3	19	16	15	21	19	10	243	27
Sur-détection (%)	6	0	20	0	38	67	0	38	26	67	37	25	0	5	84	10	26	

Matrice de confusion issue du niveau 3 de la classification sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay (image multispectrale) à partir de l'image Worldview-2

Précision totale : **0,75**

Kappa : **0,73**

	1	210	220	230	311	312	313	314	321	322	351	352	353	354	356	360	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	45		2														47	4
Cultures (210)	1	16									4						21	24
Plantations (220)			7								3						10	30
Parcs et jardins (230)				4		1				1							6	33
Forêts mésophiles (311)		1			5	3		1	1						1	1	13	62
Forêts hygrophiles (312)				1		6			2								9	33
Forêts de conifères (313)							7										7	0
Forêts de sclérophylles (314)							1	7	2	1							11	36
Fourrés mésophiles et mésohygrophiles (321)					1			2	13		3				1		20	35
Fourrés hygrophiles (322)						1				2					2		5	60
Prairies mésophiles (351)						1					12	5		1	2		21	43
Prairies hygrophiles (352)												14			9		23	39
Pelouses sur sable non fixé (353)	1												15				16	6
Pelouses sur sable fixé (354)											1			21			22	5
Roselières et cariçaies (355)										1		1			1		3	66
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (360)																9	9	0
Total	4	6	22	20	17	50	13	30	28	60	48	30	0	5	94	10	243	30
Sur-détection (%)	4	6	22	20	17	50	13	30	28	60	48	30	0	5	94	10	27	

Matrice de confusion issue du niveau 3 de la classification sur le site des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay (image fusionnée) à partir de l'image Worldview-2

ANNEXE 8

Cartographies et matrices de confusion du site «Havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay»

8.1 Niveau « Occupation du sol »



Précision totale : **0,89**

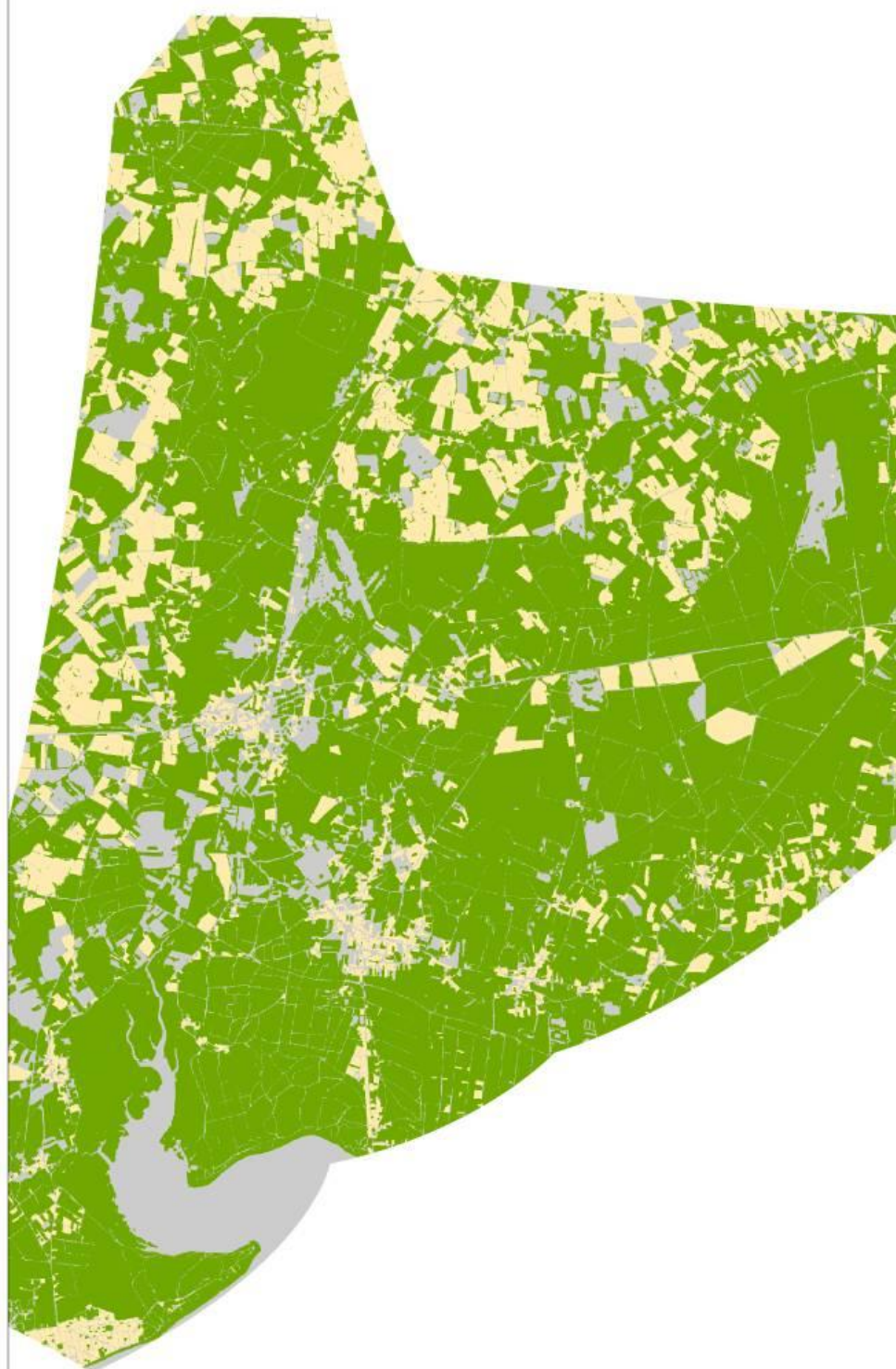
Kappa : **0,75**

	1	2	3	Total	Sous-détection (%)
Milieus non végétalisés (1)	57	2	1	60	5
Végétations artificielles (2)	2	37	21	60	38
Végétations naturelles et semi-naturelles (3)	6	17	322	345	7
Total	65	56	344	465	17
Sur-détection (%)	12	34	6	18	

Matrice de confusion issue du niveau 1 de la classification sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay à partir de la BDORTHO® IRC

Carte de la végétation au niveau 1 de la classification de l'image SPOT5

Site Natura 2000 du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay



Milieux non végétalisés
Végétations artificielles
Végétations naturelles et semi-naturelles



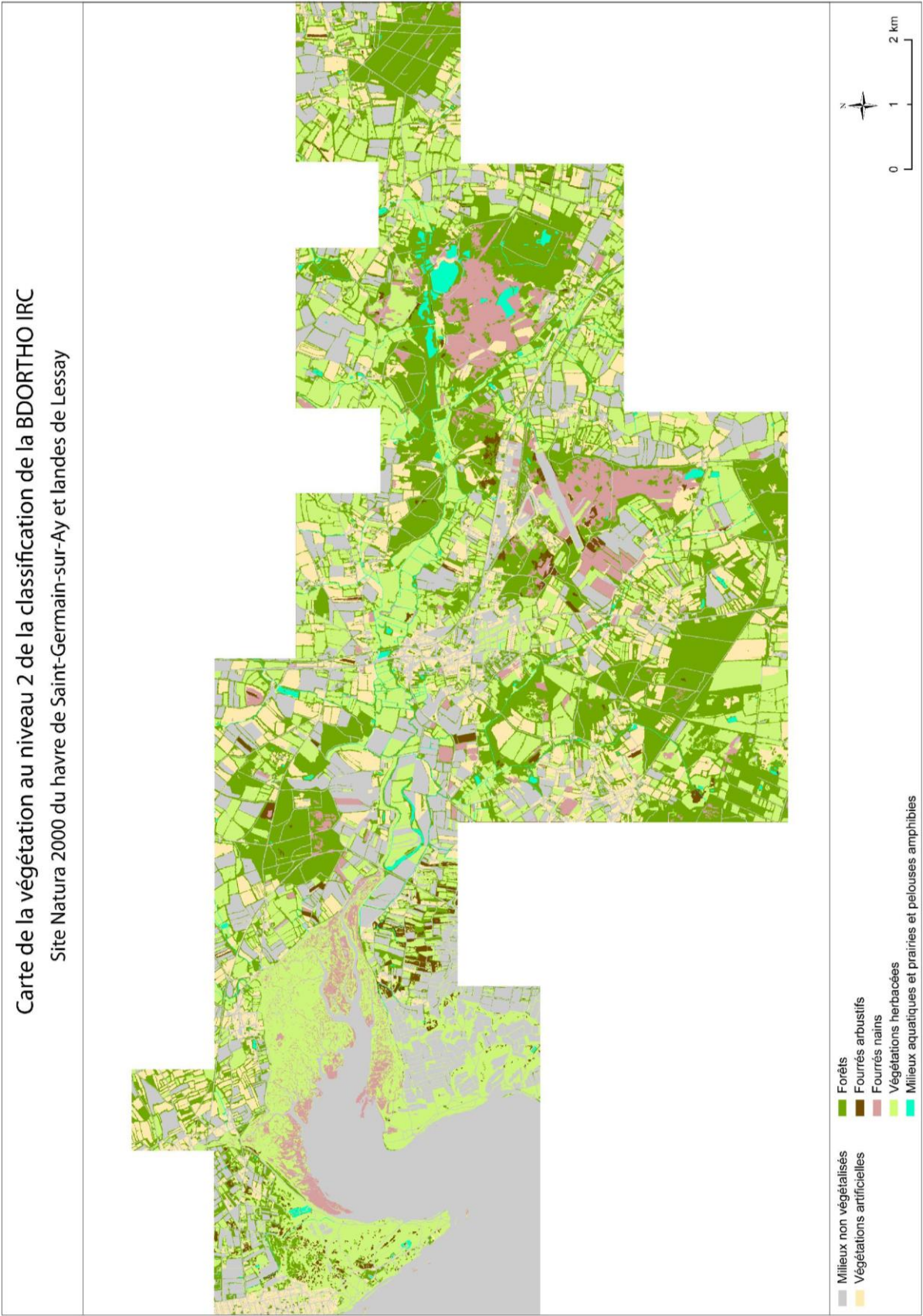
Précision totale : **0,89**

Kappa : **0,71**

	1	2	3	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	42	5	13	60	30
Végétations artificielles (2)	7	38	20	65	42
Végétations naturelles et semi-naturelles (3)	4	5	343	352	3
Total	53	48	376	477	25
Sur-détection (%)	21	21	9	17	

Matrice de confusion issue du niveau 1 de la classification sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay à partir de l'image SPOT5

8.2 Niveau « Grands types de végétations »



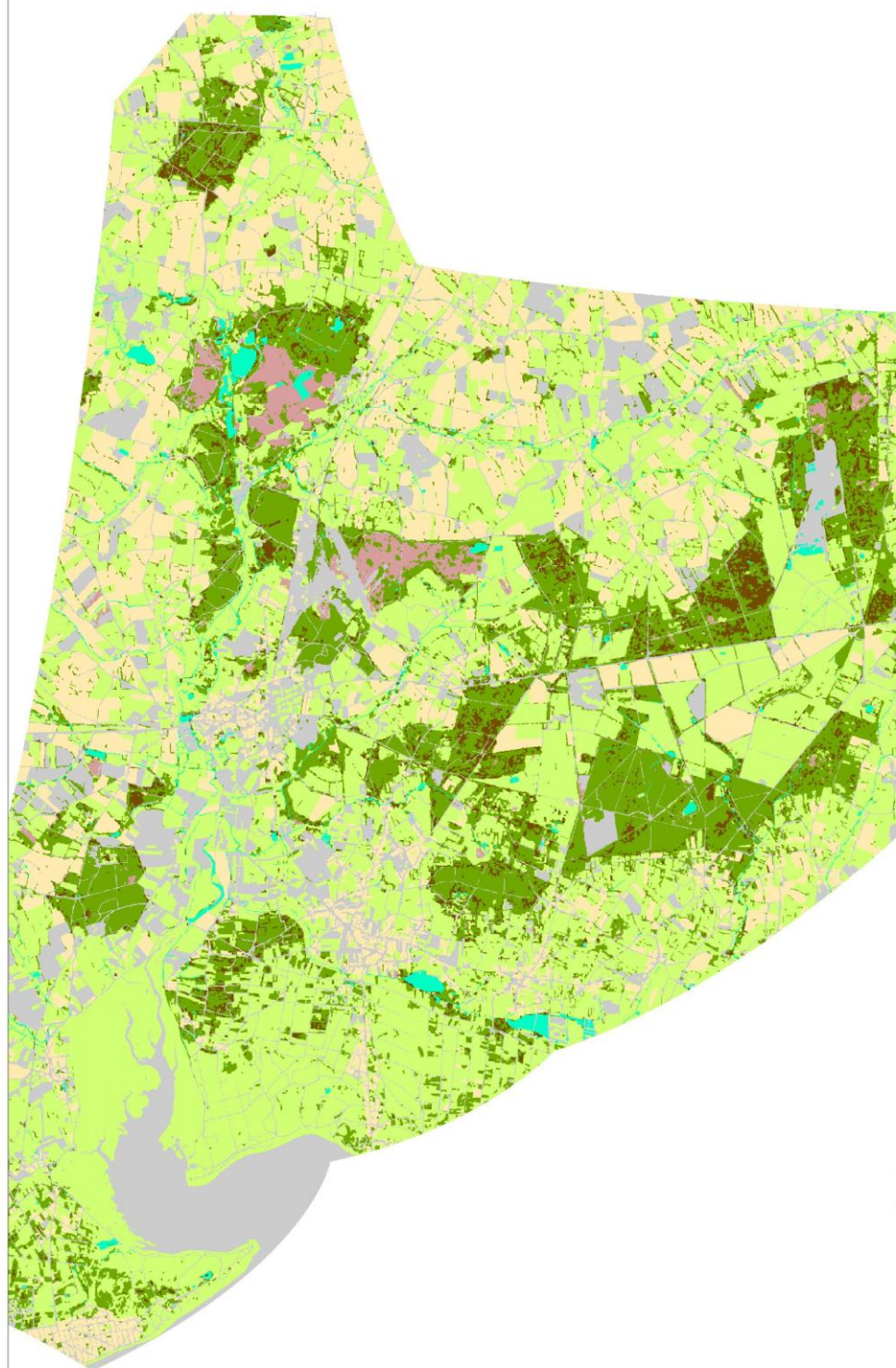
Précision totale : **0,79**

Kappa : **0,75**

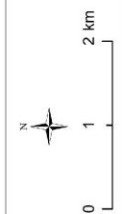
	1	21	22	23	31	32	33	35	36	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	57			2				1		60	5
Cultures (21)	1	23				2	1	16		43	47
Plantations (22)			4		1					5	20
Parcs et jardins (23)	1			10	1					12	17
Forêts (31)					61					61	0
Fourrés arbustifs (32)					22	6	1	1		30	80
Fourrés nains (33)	1	2			1		44	4		52	16
Végétations herbacées (35)	5	15			6	1	9	129		165	22
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (36)							1		36	37	3
Total	65	40	4	12	92	9	56	151	36	465	23
Sur-détection (%)	12	43	0	17	34	33	21	15	0	19	

Matrice de confusion issue du niveau 2 de la classification sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay à partir de la BDORTHO® IRC

Carte de la végétation au niveau 2 de la classification de l'image SPOT5
 Site Natura 2000 du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay



- Milieux non végétalisés
- Végétations artificielles
- Forêts
- Fourrés arbustifs
- Fourrés nains
- Végétations herbacées
- Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies



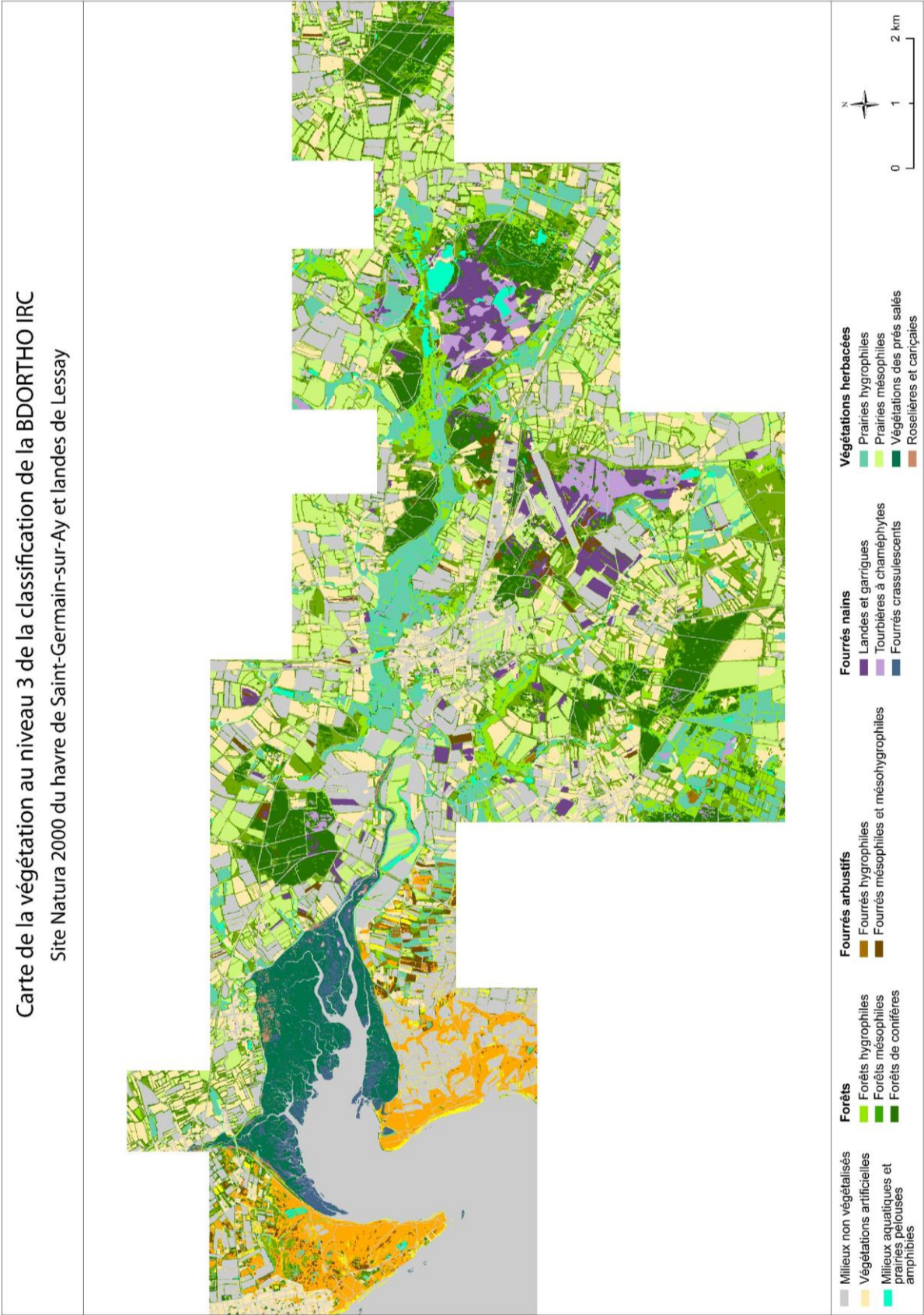
Précision totale : **0,78**

Kappa : **0,72**

	1	21	22	23	31	32	33	35	36	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	42	4		1			1	12		60	30
Cultures (21)	7	23			1	1		16		48	52
Plantations (22)			4		1					5	20
Parcs et jardins (23)				11	1					12	8
Forêts (31)					59			2		61	3
Fourrés arbustifs (32)	1				24	3		10		38	92
Fourrés nains (33)					6	1	34	2		43	21
Végétations herbacées (35)	3	5			1	1		162		172	6
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (36)					1			1	36	38	5
Total	53	32	4	12	94	6	35	205	36	477	26
Sur-détection (%)	21	28	0	8	37	50	3	21	0	19	

Matrice de confusion issue du niveau 2 de la classification sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay à partir de l'image SPOT5

8.3 Niveau « Types de formations végétales »



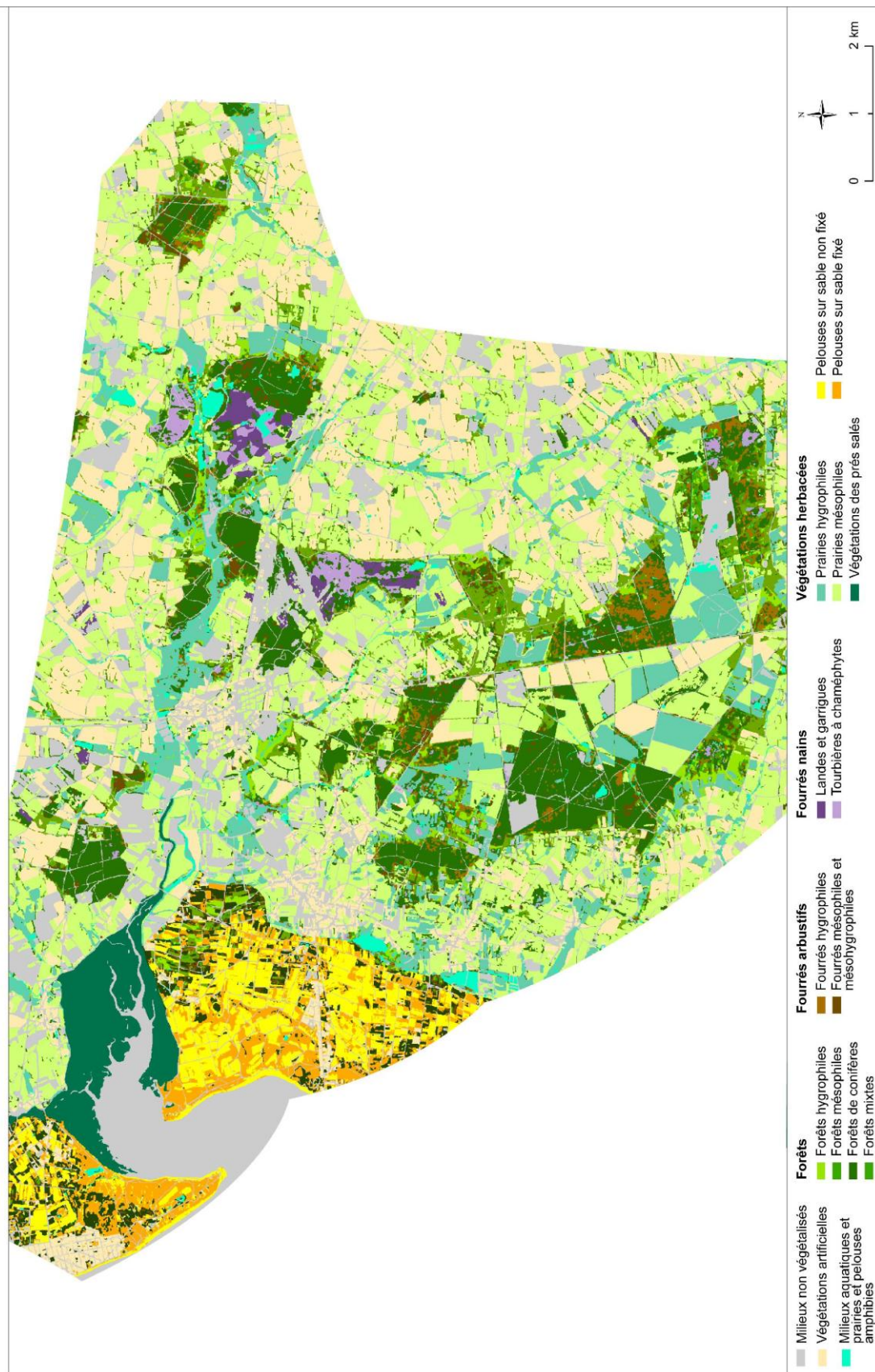
Précision totale : **0,68**

Kappa : **0,65**

	1	210	220	230	311	312	313	321	322	330	331	332	351	352	353	354	355	356	357	360	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	57			2									1								60	5
Cultures (210)	1	23						2		1			11	4		1					43	47
Plantations (220)			4		1																5	20
Parcs et jardins (230)				10			1														12	17
Forêts mésophiles (311)					19	3	2														24	21
Forêts hygrophiles (312)						11															11	0
Forêts de conifères (313)					1		25														26	4
Fourrés mésophiles et mésohygrophiles (321)					10	2	2	5	1	1						1					22	77
Fourrés hygrophiles (322)					4	3	1														8	100
Landes et garrigues (330)		2								14	19		2	1							38	63
Tourbières à chaméphytes (331)					1						4										5	20
Fourrés crassulescents (332)	1											7							1		9	22
Prairies mésophiles (351)		12											6	13		2					33	89
Prairies hygrophiles (352)		2			1	1		1				1		26			5		1		38	32
Pelouses sur sable non fixé (353)	4																				4	100
Pelouses sur sable fixé (354)															1	38					39	3
Roselières et cariçaies (355)						3								3			5		1		12	58
Franges et lisières (356)	1	1				1				3				2							8	100
Végétations des prés salés (357)												5					1		25		31	19
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (360)												1								36	37	3
Total	65	40	4	12	37	24	31	8	1	19	23	14	20	49	1	42	11	0	28	36	465	40
Sur-détection (%)	12	43	0	17	49	54	19	38	100	26	83	50	70	47	100	10	55	100	11	0	44	

Matrice de confusion issue du niveau 3 de la classification sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay à partir de la BDORTHO® IRC

Carte de la végétation au niveau 3 de la classification de l'image SPOT5
Site Natura 2000 du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay



Précision totale : **0,60**

Kappa : **0,57**

	1	210	220	230	311	312	313	314	315	321	322	330	331	351	352	353	354	355	356	357	360	Total	Sous-détection (%)
Milieux non végétalisés (1)	42	4		1								1		4		7	1					60	30
Cultures (210)	7	23						1			1			10	4	2						48	52
Plantations (220)			4		1																	5	20
Parcs et jardins (230)				11			1															12	8
Forêts mésophiles (311)					17	2	1		2					1	1							24	29
Forêts hygrophiles (312)						8	1		2													11	27
Forêts de conifères (313)							26															26	0
Forêts de sclérophylles (314)								0														0	100
Forêts mixtes (315)									0													0	100
Fourrés mésophiles et mésohygrophiles (321)	1						3	12	1	0	3			3	3							26	100
Fourrés hygrophiles (322)						2	3		3		0			3	1							12	100
Landes et garrigues (330)							6						9	21	2							38	76
Tourbières à chaméphytes (331)											1	1	3									5	40
Prairies mésophiles (351)		5					1							15	13		1					35	57
Prairies hygrophiles (352)	1										1			4	25					8		39	36
Pelouses sur sable non fixé (353)																5	1					6	17
Pelouses sur sable fixé (354)	1													2		2	34					39	13
Roselières et cariçaies (355)															5			0		7		12	100
Franges et lisières (356)														5	4				0			9	100
Végétations des prés salés (357)	1														1					30		32	6
Milieux aquatiques et prairies et pelouses amphibies (360)							1													1	36	38	5
Total	53	32	4	12	18	12	43	13	8	0	6	11	24	49	57	16	37	0	0	46	36	477	48
Sur-détection (%)	21	28	0	8	6	33	40	100	100	100	100	18	88	69	56	69	8	100	100	35	0	51	

Matrice de confusion issue du niveau 3 de la classification sur le site du havre de Saint-Germain-sur-Ay et landes de Lessay à partir de l'image SPOT5

ANNEXE 9

Rapport joint : Catalogue des traitements par grands types de végétation

ANNEXE 10

Rapport joint : Cartographie de la végétation et validation de protocoles de traitement d'image

ANNEXE 11

Rapport joint : Cartographie automatique des végétations du site de Sauzaie Jaunay (Vendée) à partir d'une image à très haute résolution Worldview-2